

# İKLİM DEĞİŞİMİ ÇERÇEVESİNDE SU KAYNAKLARININ MEVCUT DURUMU VE GELECEĞİ

**Editörler**
**Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN**
**Prof. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN**

TÜBA
Türkiye Bilimler Akademisi
Turkish Academy of Sciences

# İKLİM DEĞİŞİMİ ÇERÇEVESİNDE SU KAYNAKLARININ MEVCUT DURUMU VE GELECEĞİ

TÜBA
TÜRKİYE BİLİMLER AKADEMİSİ
TURKISH ACADEMY OF SCIENCES

**İklim Değişimi Çerçevesinde Su Kaynaklarının Mevcut Durumu ve Geleceği**
***Water Resources in The Context of Climate Change: Current Status and Future Perspectives***

© Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları, 2023 / © Turkish Academy of Sciences Publication, 2023

**TÜBA Raporları No / TÜBA Reports No:** 49

**ISBN:** 978-625-8352-56-6

**DOI:** 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6

**Editörler / Editors:**
Mehmet Emin Aydın
Ahmet Duran Şahin

**Sekreterya / Secretariat:**
Furkan Akbaş

Bu kitapta yer alan tüm yazıların dil, bilim, etik ve hukuk açısından bilimsel sorumluluğu yazarlarına aittir. Editörlerin ve Türkiye Bilimler Akademisi'nin sorumluluğu bulunmamaktadır.

The scientific responsibility for the language, scientific, ethical and legal aspects of all the articles included in the book belongs to the authors. Turkish Academy of Sciences and the editors have no responsibility.

**Türkiye Bilimler Akademisi / Turkish Academy of Sciences**
Vedat Dalokay Cad. No: 112 06670 Çankaya - Ankara
Tel: +90 312 442 29 03 • www.tuba.gov.tr

**Grafik Tasarım - Graphic Designer:**
Mustafa Altıntepe
Ali Buğra Ergin

**Birinci Baskı / 1st. Edition**

**Baskı Yeri, Tarihi/ Publication Place and Date:**
Tek Ses Ofset Matbaa / Ankara / 2023

**Baskı Adedi / Pcs.:** 1000

İklim Değişikliği Çerçevesinde Su Kaynaklarının Mevcut Durumu ve Geleceği / Ed. Mehmet Emin Aydın, Ahmet Duran şahin. ¬-- Ankara : Türkiye Bilimler Akademisi, 2023.
392 s. ; 20 x 26 cm. – (TÜBA Raporları No; 49)
Includes bibliographical references.
ISBN 978-625-8352-56-6
1.Yeraltı suları. 2. Undergrourel water. 3. İklim değişikliği. 4. Climatic changes. 5. Küresel ısınma. 6. Global warming.

QC981.8.C5 I39
553.79

Bu eser Creative Commons Alıntı-Gayrı Ticari -Türetilemez (BY-NC-ND) 4.0 Uluslararası Lisansı ile lisanslanmıştır. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-No Derivative (BY-NC-ND) 4.0 International License.

# WATER RESOURCES IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE: CURRENT STATUS AND FUTURE PERSPECTIVES

TÜBA
Türkiye Bilimler Akademisi
Turkish Academy of Sciences

# İÇİNDEKİLER

***Table of Content***

**TAKDİM**
Foreword
*Muzaffer ŞEKER*
*1*

**ÖNSÖZ**
Preface
*Mehmet Emin AYDIN, Ahmet Duran ŞAHİN*
*5*

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ, TÜRKİYE YERALTI VE YÜZEYSEL SU KAYNAKLARI**
Climate Change and Groundwater and Surface Water Resources of Türkiye
*Esra ŞILTU, Lütfi AKCA*
*9*

**KÜRESEL İKLİM PROJEKSİYONLARI VE TÜRKİYE'DE İKLİM DEĞİŞİMİ**
Global Climate Projections and Climate Change in Türkiye
*Yurdanur ÜNAL*
*29*

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE TÜRKİYE İKLİM ÖLÇÜM AĞI**
Climate Change and Climate Observation Systems of Türkiye
*Hikmet EROĞLU*
*49*

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ, HİDROMETEOROLOJİK AFETLER VE AFET YÖNETİMİ**
Climate Change, Hydrometeorological Disasters and Disaster Management
*Mikdat KADIOĞLU*
*69*

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SÜRECİNDE HİDROMETEOROLOJİK AFETLER VE TAHMİN SİSTEMİ**
Hydrometeorological Disasters and Forecast System in The Process of Climate Change
*Hakan DOĞAN*
*97*

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN TÜRKİYE YERALTISUYU KAYNAKLARINA ETKİSİ**
The Effect of Climate Change on Groundwater Resources in Türkiye
*Alper BABA, Nilüfer TİROL*
*121*

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN TÜRKİYE SU KAYNAKLARINA ETKİLERİ VE UYUM**
Climate Change Impacts on Water Resources' of Türkiye and Adaptation
*Ayşe YILDIRIM COŞGUN*
*139*

**SU KAYNAKLARI YÖNETİMİNDE HAVZA ÖLÇEKLİ FAALİYETLER**
Basin Scale Activities in Water Resources Management
*Taner KİMENÇE*
*155*

**YEREL YÖNETİMLERİN SU PLANLAMASINDA İKLİM DEĞİŞİMİNİN ROLÜ**
The Role of Climate Change in Local Governments' Water Planning
*İzzet ÖZTÜRK, Gökhan CÜCELOĞLU, Elif Zeynep DENERİ*
*171*

**SU, ATIKSU ARITIMI VE YENİDEN KULLANIMI**
Water, Wastewater Treatment and Reuse
*İsmail KOYUNCU, Mehmet Emin PAŞAOĞLU, Türker TÜRKEN, Ayşe YÜKSEKDAĞ*
*205*

**GERİ KAZANILAN KENT ATIKSULARININ SULAMADA KULLANIMI VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ**
Use of Reclaimed Urban Wastewater in Irrigation and Application Examples
*Mehmet Emin AYDIN, Senar AYDIN*
*241*

**İKLİMLER, DEĞİŞİM NEDENLERİ VE SONUÇLARI**
Climate, Reasons for Change and Results
*Doğan YAŞAR*
*263*

**TÜRKİYE HES POTANSİYELİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLERİ**
Hydraulic Power Potential of Türkiye and Climate Change Impacts
*Z. Fuat TOPRAK*
*279*

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE TÜRKİYE HİDROELEKTRİK ENERJİ PLANLAMASI**
Climate Change and Türkiye Hydroelectric Energy Planning
*Özgür SARHAN, Tuğba ATLI, Funda GÜNDOĞAN*
*299*

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN İÇSU EKOSİSTEMLERİ VE SULAK ALANLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ANALİZİ İÇİN BİR MODEL ÖNERİSİ**
Proposal for a Model Analyzing the Impact of Climate Change on Inland Aquatic and Wetland Ecosystems
*Ali ERTÜRK*
*319*

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN TÜRKİYE ORMAN EKOSİSTEMLERİNE ETKİSİ**
THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON TÜRKİYE'S FOREST ECOSYSTEMS
*Bekir KARACABEY*
*377*

**DİZİN / INDEX**
*395*

# TAKDİM

Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA), bünyesindeki çalışma grupları ve seçkin üyeleri ile birçok platformda Türkiye ve dünyadaki öncelikli konuların belirlenmesi ve bu konularda politikaların geliştirilmesine yönelik bilim temelli danışmanlık hizmeti sunmaktadır. Bununla ilgili olarak, konusunda yetkin uzmanların katılımlarıyla sempozyumlar, konferanslar, çalıştaylar düzenlemekte ve güncel konularda raporlar hazırlamaktadır. Bu bağlamda, ülkemiz ve dünya için güncel bir konu olan iklim değişimi ve buna bağlı olarak Türkiye'deki su kaynaklarının durumu ve gelecek perspektifi TÜBA-Çevre, Biyoçeşitlilik ve İklim Değişikliği Çalışma Grubu tarafından İstanbul Teknik Üniversitesi ev sahipliğinde düzenlenen bir çalıştay ile her yönüyle ele alınmıştır.

İnsanoğlunun bitmek tükenmek bilmeyen istekleri ve kazanç hırsı gelecek nesillere ve dünyamıza zarar vermektedir. Bu tatminsizliğin etkilediği alanlar arasında çevre, iklim ve biyoçeşitlilik de yer almaktadır. Bu çerçevede, sadece Türkiye'yi değil tüm dünyayı etkileyen küresel sorunların başında gelen iklim değişikliği ve su kaynaklarının giderek azalmasına bağlı olarak kaynaklarımızın gelecek nesillere aktarılması konusu bilim insanları tarafından tartışılmaktadır. Ayrıca, iklim değişikliği sadece çevreye değil, aynı zamanda gıdadan sağlığa, ekonomiden güvenliğe dek uzanan birçok alanı da olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla, yaşanan bu hızlı bozulma, hayati bir konu haline gelmiştir. Bilim insanlarının defaatle yaptığı uyarılar ve ekosistemdeki hızlı bozulma, küresel ve yerel iş birlikleri çerçevesinde karar alıcıları hızlı ve dikkatli bir şekilde gerekli adımları atmaya yönlendirmiştir. Doğal süreç içerisinde ortaya çıkan afetlerin engellenmesi mümkün değildir fakat hasarlarının azaltılması veya ortadan kaldırılması insanoğlunun alacağı tedbirler ve bu konudaki birikimleri ile mümkündür. Afetler sonucu ortaya çıkan hasarların faturasının doğal afetlere bağlanmasının, hasar azaltıcı tedbirlerin alınması üzerinde engelleyici veya geciktirici bir negatif etki bıraktığı gerçeği göz önünde bulundurularak coğrafyanın değerlendirilmesinde, ekosistemin korunması ve yerel yerleşim alanlarının tespitlerinde bilimsel verilere ve tecrübelere daha fazla özen gösterilmelidir.

Türkiye'de de iklim değişikliğine bağlı olarak ekstrem hava olayları daha fazla görünür olmaya başlamıştır. Türkiye'de ortalama hava sıcaklığında 1.5 ile 4.0 °C arasında artış beklenirken toplam yağış miktarında ise azalma beklenmektedir. Bu sıcaklık artışları dünya ortalamasından 1-2 °C daha yüksektir. Bu kapsamda en büyük sorun kuraklık, taşkın ve yeraltı sularının aşırı kullanımıdır. Ülkemizde yeraltı suyu seviyelerinde düşüşler gözlenmektedir. Bu sebeple geri dönüşüm metotlarının değerlendirilmesi ve yeraltı suyu depolama çalışmalarının uygun yerlerde yapılması gerekmektedir.

Su kaynakları açısından hem toplamda hem de kişi başı ortalamada Türkiye'nin dünya ortalamasının altında kalmasından dolayı karar alıcılar tarafından uygun çözümler geliştirilmektedir. Bütünleşik su yönetimi, su kaynaklarının korunumu konusunda önemli bir çözümdür. Geri dönüşüm ve sürdürülebilirlik kavramlarının önemi, bilinçsiz tüketim ve kaynakların azalması sorunlarına iklim değişiminin de eklenmesi ile daha da artmaktadır. Atık suların arıtılarak evsel ve endüstriyel olarak kullanılması gibi örneklerle atık suyun yeniden kullanılması prensibi ile su döngüsüne dâhil edilmesi gerekmektedir. Başta basit maliyetlerle su tasarrufu sağlamak olmak üzere su tüketimi ile ilgili eğitimlerin halka indirgenmesi ve sürdürülebilir hale getirilmesi mümkündür.

Ülkemizde havadaki emisyonu azaltmak için önemli bir karbon tutucu olan orman alanlarının varlığının arttırılması planlanmaktadır. İklim değişikliği ile beraber yüksek hava sıcaklıkları nedeniyle meydana gelen orman yangınlarına müdahale kapsamında da ülkemiz Milli İHA'ları kullanarak orman yangınlarını tespitte ve bunlara müdahalede başarılı ülkelerin başında gelmektedir.

İklim değişikliği bir kalkınma sorunudur. Küresel ekonomik ve finansal sistemin daha fazla kâr etmek amacıyla tüketim odaklı kaynak kullanımı, coğrafi dengesizlikler şekillendirmesi ve doğaya salınan zararlı atıklar biyoçeşitlilik ve ekolojik dengenin bozulması konularında en önemli etkendir. Geri dönüşüm konusunda son yıllarda ortaya konan çabalar biraz da timsah gözyaşlarını andırmakta, bu konuda gelecek kuşakların hakkına girmemek adına zararın neresinden dönülse kardır düşüncesiyle acil yoğun çaba sarf etmek zorunluluğu doğmuştur. Bununla birlikte, su kaynaklarını finansal sürdürülebilirlik açısından da değerlendirilmesi ve çalışma yapılması önemlidir.

Yaşam için vazgeçilmez bir kaynak olan suyun gelecek nesillere aktarımı öncelikli amacımız olmalıdır. Bu doğrultuda TÜBA-Çevre Biyoçeşitlilik ve İklim Değişikliği Çalışma Grubumuzca su kaynaklarının korunumu konusunda topluma katkı sağlayacağını düşündüğümüz "İklim Değişikliği Çerçevesinde Su Kaynaklarının Mevcut Durumu ve Geleceği" kitabı birçok farklı disiplinin katkılarıyla oluşturulmuştur. Bu kitabın hazırlanmasında emeği geçen TÜBA-Çevre Biyoçeşitlilik ve İklim Değişikliği Çalışma Grubu Üyelerine, rapora katkı sağlayan bilim insanlarına ve TÜBA çalışanlarına teşekkür ediyor; raporun milletimiz ve ülkemiz için önemli bir konuya ışık tutarak yararlı olmasını diliyorum.

**Prof. Dr. Muzaffer ŞEKER**
***TÜBA Başkanı***

# FOREWORD

The Turkish Academy of Sciences (TÜBA), with its working groups and distinguished members, provides science-based consultancy services on many platforms to identify high-priority issues in Türkiye and the world and to develop policies on these issues. In this regard, it organizes symposiums, conferences and workshops with the participation of qualified experts and prepares reports on current issues. In this context, climate change, which is a current issue for our country and the world, and consequently the status and future perspective of water resources in Türkiye were discussed in all aspects by TÜBA-Environment, Biodiversity and Climate Change Working Group in a workshop hosted by Istanbul Technical University.

The never-ending demands of humanity and the pursuit of profit are harming future generations and our world. Environment, climate and biodiversity are among the areas affected by this discontent. In this context, climate change, which is one of the leading global problems affecting not only Türkiye but the whole world, and the transfer of our resources to future generations due to the gradual decrease in water resources are discussed by scientists. Moreover, climate change has a negative impact not only on the environment, but also on many other areas ranging from food to health, economy to security. Therefore, this rapid deterioration has become a major issue. Repeated warnings by scientists and the rapid deterioration of the ecosystem have led decision-makers to take the necessary steps quickly and carefully within the framework of global and local cooperation. It is not possible to prevent disasters that occur in the natural environment, but it is possible to reduce or eliminate their damages with the measures to be taken by human beings and their knowledge in this field. Considering the fact that blaming the damages caused by disasters on natural disasters has a negative effect on the taking of damage-reducing measures, more attention should be paid to scientific data and experience in the evaluation of geography, protection of the ecosystem and determination of local settlement areas.

Extreme weather events have become more visible in Türkiye due to climate change. In Türkiye, average air temperature is expected to increase between 1.5 and 4.0 °C, while total rainfall is expected to decrease. These temperature increases are 1-2 °C higher than the world average. In this context, the biggest problem is drought, flooding and overuse of groundwater. Decreases in groundwater levels are observed in our country. For this reason, recycling methods should be evaluated and groundwater storing activities should be carried out in appropriate places.

Since Türkiye is below the world average in terms of total and per capita water resources, appropriate solutions are being developed by decision-makers. Integrated water management is an important solution for the conservation of water resources. The importance of recycling and sustainability concepts is increasing with the addition of climate change to the problems of unconscious consumption and resource depletion. With examples such as the treatment of wastewater and its use for domestic and industrial purposes, wastewater should be included in the water cycle with the principle of reuse. It is possible to reduce education on water consumption to the public and make it sustainable, especially to save water with simple costs.

In our country, it is planned to increase the presence of forest areas, which are important carbon absorbers, in order to reduce emissions in the air. Within the scope of intervention to forest fires caused by high air temperatures due to climate change, our country is one of the most successful countries in detecting and responding to forest fires by using Turkish UAVs.

Climate change is a development problem. The consumption-oriented use of resources by the global economic and financial system in order to make more profit, shaping geographical imbalances and harmful wastes released into nature are the most important factors in the deterioration of biodiversity and ecological balance. The efforts put forth in recent years on recycling resemble crocodile tears, and it has become necessary to make urgent intensive efforts in this regard, with the idea that it is better to cut corners in order not to violate the rights of future generations. However, it is also important to evaluate and study water resources in terms of financial sustainability.

The transfer of water, an indispensable resource for life, to future generations should be our primary goal. In line with this, the book titled "Current Situation and Future of Water Resources in the Framework of Climate Change Workshop" which we believe will contribute to society in terms of the conservation of water resources, has been created with the contributions of various disciplines by our TÜBA-Environment, Biodiversity, and Climate Change Working Group. I would like to express my gratitude to the members of the TÜBA-Environment, Biodiversity, and Climate Change Working Group, the scientists who contributed to the report, and the staff of TÜBA who were involved in the preparation of this book. I hope that the report sheds light on an important issue for our nation and country and proves to be useful.

**Prof. Dr. Muzaffer ŞEKER**
***TÜBA President***

# ÖNSÖZ

Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA)'nin Çevre Biyoçeşitlilik ve İklim Değişikliği (ÇEBİD) çalışma grubu tarafından İTÜ ev sahipliğinde, İklim Değişikliği Çerçevesinde Su Kaynaklarının Mevcut Durumu Ve Geleceği Çalıştayı 23-24 Eylül, 2022 tarihleri arasında düzenlenmiştir.

Bilindiği üzere tarih boyunca iklim sürekli değişmiştir ancak günümüzde bu değişiklik eskisinden farklı olarak insan kaynaklı olmak üzere hızlı gerçekleşmektedir. Küresel ortalama sıcaklık değişimi endüstri devrimi sonrasında atmosferdeki $CO_2$ miktarının iki katına çıkarılması ile ortalama sıcaklığın 1.5-4.0 °C derece aralığında artacağı şeklinde farklı senaryolara bağlı olarak tahminler yapılmaktadır. İklimdeki bu hızlı değişim bütün dünya ekosistemini doğrudan etkilemiş ve bu sebepten dolayı karar vericileri bazı önlemler almaya yönlendirmiştir.

Ayrıca, doğal afetlerin önemli bir bölümü meteorolojik kaynaklı olup tarih boyunca insanlar bu afetlerden korunmak için önlem alma yoluna gitmişlerdir. Doğal olarak adlandırılan bu afetler belirli zaman aralıklarında tekrar gözlemlenmiş ve bu çerçevede yerleşimler gerçekleştirilmiştir. İklim değişikliği sürecinde bu afetlerin şiddet ve sıklıklarının artmakta olduğu bugüne kadar yapılan bütün bilimsel çalışmalarda kabul görmüştür. Bunun yanında, doğal süreçlerde gerçekleşen afetlerin de iklim değişikliğine bağlanması tasarım gerçekleştirenler ve karar vericiler açısından önemli negatif sonuçlar doğurmaktadır. Sürekli olarak gerçekleşen her meteorolojik afetin iklim değişikliği ile ilişkilendirilmesi sorumlulukların paylaşılması açısından içinden çıkılamaz bir hal almıştır. Çalıştay süresince bu durum gündeme getirilmiş ve bütün afetlerin iklim değişikliğine bağlanmasına eleştiriler getirilmiştir.

Tatlı su kaynaklarının dünyanın farklı bölgelerinde düzensiz dağılımı sonucunda su zengini ülkelerin yanında su kıtlığı yaşayan ülkeler de hızla artmaktadır. Doğal afetlerin yanında insan kaynaklı yanlış kullanımdan dolayı su kaynaklarının kirletilmesi önemli bir sorun olarak görülmektedir. Özellikle tatlı su kaynaklarının kirletilmesi, tarım alanlarında etkin sulama yöntemlerinin yaygın olmaması, iklim değişikliği etkileri ile bir araya geldiğinde dünyada birçok ülkenin su fakiri konumuna geldiği bilinmekle birlikte ülkemiz de bu gruba girme yolundadır. Çalıştay'da detaylı ele alınan konu iklim değişikliğinin su kaynaklarına olan etkisidir. Su kaynakları açısından dünya ve Türkiye su potansiyelleri ele alınmıştır.

Çalıştay süresince su ve su kaynakları ile ilgili aşağıdaki sorunlar gündeme gelmiş ve bazı çözüm önerileri sunulmuştur.

Çalıştay sırasında gündeme gelen sorunlar arasında su kaynaklarının düzensiz dağılımı, iklim değişikliğine bağlı su kaynaklarında yer değişimleri, mevsimsel su kaynaklarında davranış değişiklikleri, şiddetli sel ve taşkınlar, tarımda suyun yanlış kullanımı, yeraltı sularının plansız tüketimi, yeraltı sularında seviye düşüşleri ve depolama eksiklikleri, tatlı su kaynaklarının kirletilmesi,

tatlı su göllerinde küçülme ve kurumaların gerçekleşmesi, sucul ekolojinin zarar görmesi, sucul ekolojinin önemli bir kaynağı olan ormanların ekstrem yangınlara maruziyeti, sektörel bazlı su tahsis planlamalarındaki eksiklikler, kurak süreçlerde hidroelektrik tesislerde yaşanan verim kayıpları, yerel yönetimlerin su arzında sınırlı kaynaklara sahip olmaları, yerel yönetimlerde su kaçak ve kayıpları, müsilaj ve deniz suyunu etkileyen kirleticiler, deniz suyu sıcaklığının ve seviyesinin artışı vb. sorunlar yeralmıştır.

Gündeme gelen sorunlara önerilen çözümler arasında: Havza bazlı su planlaması, iklim değişikliğine bağlı afet ve ekstremlerin yeniden tanımlanması, iklim değişikliği senaryoları çerçevesinde su potansiyellerinde değişimlerin belirlenmesi, tarım ürün desenlerinde değişikliğe gidilmesi, orman yangınlarında alınması gereken önlemler ve bilinçlendirme, su tüketimi ile ilgili eğitimlerin halka indirgenmesi ve sürdürülebilir hale getirilmesi, su kaynaklarının kirletilmesinin önüne geçmek için derin deşarj tesislerinin kurulması, membran teknolojilerinin kirli ve gri su kaynaklarında kullanımı, sucul ekosistemlerin koruma altına alınması, sanayide kullanılan suyun kalite kontrollerinin sürekliliğinin sağlanması, taşkınların yer altı su depolamaları için kullanılması, yerelde yağmur suyu hasadı, su üstü güneş enerji kaynaklarının yaygınlaştırılması, su kayıp ve kaçakların azaltılması, yerleşim yerlerinde sel-taşkın afetlerine karşı yeni ekstremler çerçevesinde yeniden hesaplamaların yapılması, havza bazlı ve havzalar arası bütünleşik su planlamasının gerçekleştirilmesi, bütünleşik atık su planlaması, su kaynaklı afetlerin yönetiminden önce risklerinin yönetilmesi vb. çözümler önerilmiştir.

Çalıştay süresince sürekli olarak gündeme getirilen önemli bir konu yaşanan sorunların iklim değişikliği kaynaklı olup olmadığının netleştirilmesidir. Planlama, kullanma kaynaklı su sorunları ile iklim değişikliği kaynaklı problemlerin birbirleriyle karıştırılmaması birçok kez vurgulanmıştır. Ayrıca, bütünleşik su yönetimi ile ilgili farklı konular gündeme alınmıştır. Uluslararası sularımızın bütünleşik planlaması ve politikanın bu çerçevede yapılması diğer önemli bir gündem oluşturmuştur. Bunun yanında, iklim değişikliği kaynaklı sorunları gidermek için imzalanan uluslararası anlaşma ve sözleşmelerin hedeflerine ulaşılabilmesi için çabaların devam ettirilmesi ve 2053 sıfır karbon emisyon hedefinin gerçekleştirilmesi için planlama yapılması gündeme getirilmiştir.

Çalıştayı teşrif eden Sayın İstanbul Valisi ile kamu kurum temsilcilerine, çalıştayın tüm aşamalarında destek olan TÜBA Başkanı Prof. Dr. Muzaffer Şeker'e, İTÜ Rektörü Prof. Dr. İsmail Koyuncu'ya, TÜBA Konsey Üyelerine, Çevre Biyoçeşitlilik ve İklim Değişikliği Çalışma Grubu Üyelerine, makaleleri sunan değerli müelliflere, makaleleri değerlendiren hakem heyetine, bu süreçlerin takibini yapan TÜBA ve İTÜ personeline teşekkür ederiz.

**Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN**
***TÜBA Çevre, Biyoçeşitlilik ve İklim Değişikliği Çalışma Grubu Yürütücüsü***

**Prof. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN**
***TÜBA Çevre, Biyoçeşitlilik ve İklim Değişikliği Çalışma Grubu Üyesi***

# PREFACE

The Workshop on the Current Status and Future of Water Resources within the Framework of Climate Change was organized by the Environment, Biodiversity and Climate Change (ÇEBİD) working group of the Turkish Academy of Sciences (TÜBA) in collaboration with Istanbul Technical University (ITU) on September 23-24, 2022.

As is known, the climate has been constantly changing throughout history, but nowadays, this change is happening rapidly, primarily due to human activities. Global average temperature change is projected to increase within a range of 1.5-4.0°C, depending on different scenarios, following a doubling of atmospheric $CO_2$ levels since the industrial revolution. This rapid climate change directly affects the entire global ecosystem, prompting decision-makers to take certain measures.

Furthermore, a significant portion of natural disasters is meteorologically driven, and throughout history, humans have taken measures to protect themselves from these disasters. Naturally occurring disasters have been observed at certain intervals, and settlements have been established accordingly. In all scientific studies conducted to date, it has been widely accepted that the intensity and frequency of these disasters are increasing during the process of climate change. Moreover, attributing natural process-related disasters to climate change has significant negative consequences for designers and decision-makers. The constant association of every meteorological disaster with climate change has become an unmanageable situation in terms of shared responsibilities. During the workshop, this issue was addressed, and criticisms were raised regarding linking all disasters to climate change.

As a result of the uneven distribution of freshwater resources in different parts of the world, water-rich countries as well as countries experiencing water scarcity are rapidly increasing. In addition to natural disasters, pollution of water resources due to human misuse is seen as an important problem. It is known that many countries in the world have become water poor, especially when pollution of freshwater resources, the lack of effective irrigation methods in agricultural areas, and the effects of climate change come together, and our country is on its way to joining this group. The issue discussed in detail at the workshop was the impact of climate change on water resources. In terms of water resources, the water potentials of the world and Türkiye were discussed.

During the workshop, the following problems related to water and water resources were raised and some solution proposals were presented.

Among the problems raised during the workshop were irregular distribution of water resources, changes in the location of water resources due to climate change, changes in the behavior

of seasonal water resources, severe floods and overflows, misuse of water in agriculture, unplanned consumption of groundwater, level drops in groundwater and storage gaps, pollution of freshwater resources, shrinkage and drying of freshwater lakes, damage to aquatic ecology, exposure of forests, an important source of aquatic ecology, to extreme fires, deficiencies in sector-based water supply planning, efficiency losses in hydroelectric facilities during dry periods, limited resources of local governments in water supply, water leakage and losses in local governments, mucilage and pollutants affecting seawater, increase in seawater temperature and level, etc. problems.

Among the proposed solutions to the emerging issues, the following have been suggested: watershed-based water planning, redefining disasters and extremes due to climate change, identifying changes in water potentials within climate change scenarios, changing agricultural crop patterns, taking measures and raising awareness about forest fires, educating the public about water consumption and making it sustainable, establishing deep discharge facilities to prevent water source pollution, utilizing membrane technologies for treating contaminated and greywater sources, protecting aquatic ecosystems, ensuring continuous quality control of water used in industries, utilizing floods for underground water storage, implementing rainwater harvesting at the local level, promoting the use of solar energy sources for water surface, reducing water losses and leakages, recalculating flood risk in settlements according to new extremes, implementing integrated water planning at the watershed and inter-watershed levels, integrating wastewater planning, managing the risks of water-related disasters before their occurrence, and so on.

An important issue that was repeatedly raised during the workshop was to clarify whether the problems experienced were caused by climate change or not. It was emphasized many times that water problems arising from planning and utilization should not be confused with problems arising from climate change. In addition, different issues related to integrated water management were brought to the agenda. Integrated planning of our international waters and making policy within this framework constituted another important subject on the agenda. In addition, it was brought to the agenda to continue efforts to achieve the goals of international agreements and conventions signed to address the problems caused by climate change and to plan for the realization of the 2053 zero carbon emission target.

We would like to express our gratitude to the esteemed Governor of Istanbul and representatives of public institutions who attended the workshop, TÜBA President Prof. Dr. Muzaffer Şeker for his continuous support throughout the workshop, ITU Rector Prof. Dr. İsmail Koyuncu, TÜBA Council Members, members of the Environmen, Biodiversity and Climate Change Working Group, valuable authors who presented their articles, the peer review panel who evaluated the articles, and the TÜBA and ITU staff who diligently followed the process. Thank you all for your contributions.

**Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN**
***TÜBA Environment, Biodiversity and Climate Change Working Group Executive Director***

**Prof. Dr. Ahmet Duran ŞAHİN**
***TÜBA Environment, Biodiversity and Climate Change Working Group Executive Member***

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ, TÜRKİYE YERALTI VE YÜZEYSEL SU KAYNAKLARI

# CLIMATE CHANGE AND GROUNDWATER AND SURFACE WATER RESOURCES OF TÜRKİYE

*Esra ŞILTU*
*Lütfi AKCA*

DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch01

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ, TÜRKİYE YERALTI VE YÜZEYSEL SU KAYNAKLARI

***Esra ŞILTU***
*Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü*

***Lütfi AKCA***
*Türkiye Su Enstitüsü Başkanı*

**Özet**

İklim değişikliğinin, hidrolojik döngü ve su kaynakları üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır ve bu etkiler son yıllarda dünya genelinde daha fazla hissedilmektedir. Tüm dünyada iklim değişikliğine uyum çabalarının çoğunluğunu su kaynaklarına ilişkin yatırımlar ve tedbirler oluşturmaktadır. Bu çalışmada, iklim değişikliğinin Türkiye'de su kaynakları üzerindeki etkileri, uyum, dayanıklılık ve azaltım faaliyetleri ile yapılması gereken çalışmalara ilişkin öneriler ele alınmaktadır. Bu kapsamda, dünyada ve Türkiye'de su kaynaklarının durumu, kullanımı ve suya ilişkin sorunlara değinilmiş, su kaynaklarında iklim değişikliğine uyum ve dayanıklılık çalışmaları ile su yatırımlarının iklim değişikliği azaltım faaliyetlerine katkıları özetlenmiş ve su-gıda-enerji ekseninde iklim değişikliğine uyum, dayanıklılık ve azaltımın artırılması ve su, gıda ve enerji arz güvenliğinin sağlanması için yapılması gereken ilave çalışmalara ilişkin öneriler sunulmuştur.

***Anahtar Kelimeler***
*İklim değişikliği, Türkiye su kaynakları, İklim değişikliğine uyum*

# CLIMATE CHANGE AND GROUNDWATER AND SURFACE WATER RESOURCES OF TÜRKİYE

***Esra ŞILTU***
*General Directorate of State Hydraulic Works*

***Lütfi AKCA***
*President of Turkish Water Institute*

**Abstract**

Impacts of climate change are even more considerable in the recent years globally and it has significant implications on hydrological cycle and water resources. In global scale, majority of the climate change adaptation and resilience efforts are concentrated on water resources and water investments. In this study, implications of climate change on water resources in Türkiye were discussed along with adaptation, resilience and mitigation studies related to water resources. In this context, state and usage of water resources around the globe and specifically in Türkiye were addressed as well as water-related problems. In addition to these, climate change adaptation and resilience activities in the context of water resources management and contributions of water investments to climate change mitigation were presented. Finally, suggestions on actions needed to enhance climate change adaptation, resilience and mitigation of water resources and ensure water, energy and food supply security in water-food-energy nexus were put forward.

***Keywords***
*Climate change, Water resources of Türkiye, Climate change adaptation*

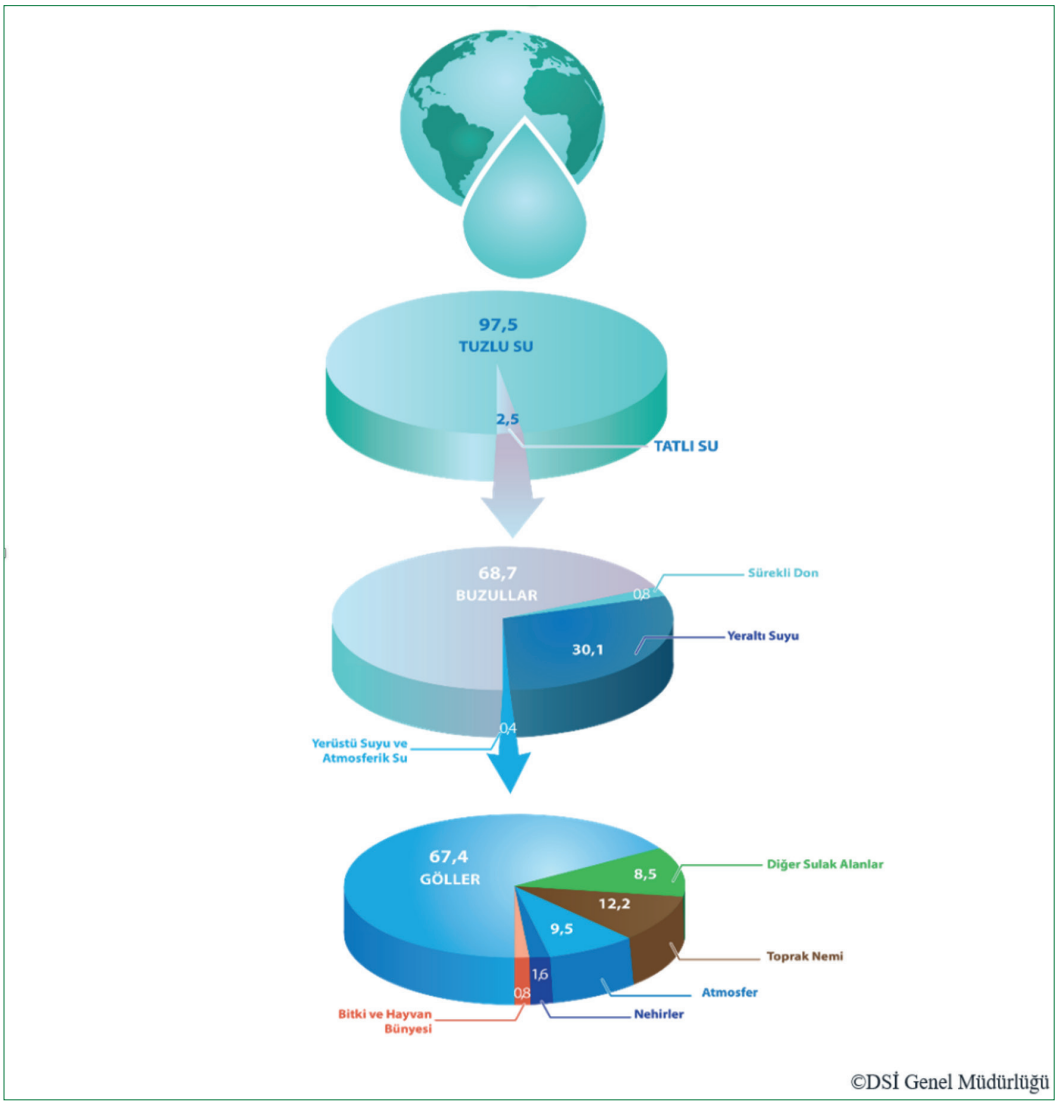
## 1. Giriş

Küresel iklim değişikliği, hidrolojik döngü ve su kaynakları üzerinde yadsınamayacak etkilere sahiptir. Dünya ısındıkça hidrolojik döngü hızlanmakta ve yağış rejimindeki değişimler neticesinde tatlı su ekosistemleri üzerindeki baskı artmaktadır (Oki ve Kanae, 2006, s. 1068). İklim değişikliğine bağlı olarak, tuzlu su miktarı, tatlı su rezervlerine kıyasla artarken, arazi kullanımları değişmekte, buzullar ve kar kütleleri erimekte, yeraltı sularının kullanımı aşırı seviyede artmakta, kıtalar kuraklaşırken deniz seviyeleri yükselmektedir (Bates vd., 2008, s. 15). Dünyanın bazı bölgeleri geçmişe kıyasla daha az yağış alırken bazı bölgeleri daha fazla yağış almakta, yağış ve sıcaklık rejimleri tahmin edilemeyen şekilde değişmektedir. Bu nedenle, dünya genelinde suya bağlı afetlerin sıklığı ve şiddetinde önemli artışlar gözlenmektedir. Birleşmiş Milletler verilerine göre 2001-2018 yılları arasında dünya genelinde meydana gelen afetlerin %74'ü su kaynaklıdır ve son 20 yılda taşkınlar ve kuraklık nedeniyle 166 binden fazla insan hayatını kaybetmiş ve yaklaşık 700 milyar dolar ekonomik zarar oluşmuştur (UNESCO&UN Water, 2020). Bununla birlikte, 733 milyonu yüksek ve kritik seviyede olmak üzere 2,3 milyar insan su stresi deneyimlenen ülkelerde yaşamaktadır (UN Water, 2021). Diğer taraftan, su kaynaklarının kalitesi gittikçe bozulmakta, her yıl yaklaşık 1,4 milyon kişi patojenler ile kontamine olmuş içme suyu kullanımı ve atıksuların uygun şekilde arıtılmaması nedeni ile hayatını kaybetmektedir (UN Environment, 2019). Tüm bu gerçekler, iklim değişikliğinin etkilerinin giderek daha da fazla hissedildiği günümüzde, su kaynakları yönetimine her zamankinden daha fazla önem verilmesi gerektiğini gözler önüne sermektedir. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde, su kaynakları yönetiminde bilimsel ve teknik gelişmelerden daha çok, iyi bir su yönetimi anlayışına ihtiyaç vardır (Boretti ve Rosa, 2019).

Bu çalışmada, Türkiye'nin mevcut su varlığı ve su yönetimine ilişkin uygulamaları iklim değişikliği etkileri göz önüne alınarak değerlendirilmiş ve yeni bir su politikasına duyulan ihtiyaç ve öneriler ortaya konulmuştur.

## 2. Dünyada Su Kaynaklarının Dağılımı ve Kullanımı

Yeryüzünün büyük bir çoğunluğu sularla kaplıdır. Bilim insanlarınca, dünyanın toplam su varlığını tahmin eden birçok çalışma yayımlanmıştır (Kotwicki, 2009; Shiklomanov, 2000). Bununla birlikte, bu çalışmalar varsayımlar ve tahminlere dayalı olduğundan belirsizlikler içermektedir. Yine de, literatürde en çok kabul gören çalışmaların verileri dikkate alınarak yeryüzünün yaklaşık %71'inin suyla kaplı olduğunu söylemek mümkündür (USGS, 2019). Buna rağmen, kullanılabilir tatlı su kaynaklarının toplam su varlığına oranı oldukça düşüktür. Şekil 1'den anlaşıldığı üzere toplam su kaynaklarının büyük bir kısmını insani tüketim amacıyla kullanılamayacak durumda olan su kaynakları oluşturmaktadır. Shiklomanov (2000), yaptığı çalışmada toplam su kaynaklarının %97,5'ini tuzlu suların, geriye kalan %2,5'lik kısmını ise tatlı suların oluşturduğunu ortaya koymuştur.




***Şekil 1.*** *Dünyada su kaynaklarının dağılımı (UNESCO World Water Assessment Report 2'den uyarlanmıştır.)*

Bununla birlikte, tatlı suların büyük kısmının (%68,7) buzullar ile dağlık bölgelerde bulunan buz kütlelerinden oluştuğunu, %29,9'luk kısmının yeraltı sularında, yalnızca %0,26'lık kısmının ise, nehir, göl ve rezervuar sistemlerinde bulunduğunu öngörmektedir (Shiklomanov, 2000). Bu çalışmanın geliştirilmesi neticesinde suyun yerkürede dağılımına ilişkin daha detaylı veriler elde edilmiş olup, bu veriler Şekil 1'de gösterilmektedir (Shiklomanov ve Rodda, 2003 aktaran UNESCO-WWAP, 2006, s. 121). Bununla birlikte, dünya genelinde tatlı su kaynakları ile nüfus doğru orantılı olarak dağılmamaktadır. Nüfusun fazla olduğu Asya ve Afrika kıtalarında tatlı su kaynakları kısıtlıdır. Bu durum, söz konusu bölgelerde su sorunlarının vahametini ve iklim değişikliği etkilerine karşı kırılganlığı artırmaktadır.

***Tablo 1.*** *Falkenmark İndeksi*

| **Yıllık Kişi başına Düşen Su Miktarı ($m^3$/Yıl/Kişi)** | **Durum** |
|---|---|
| >1700 | Su stresi yok |
| 1000-1700 | Su stresi |
| 500-1000 | Su kıtlığı |
| <500 | Mutlak su kıtlığı |

Son 100 yılda, küresel tatlı su kullanımı 6 kat artmış olup, 1980'den beri her yıl kabaca %1 oranında artmaya devam etmektedir (United Nations, 2021). Dünya ortalamasına bakıldığında, yıllık bazda su tüketiminin %69'unu tarımsal kullanım oluşturmaktadır. Bunun yanında, küresel olarak suyun %19'u sanayide, %12'si ise insani tüketim amacıyla kullanılmaktadır (United Nations, 2021).

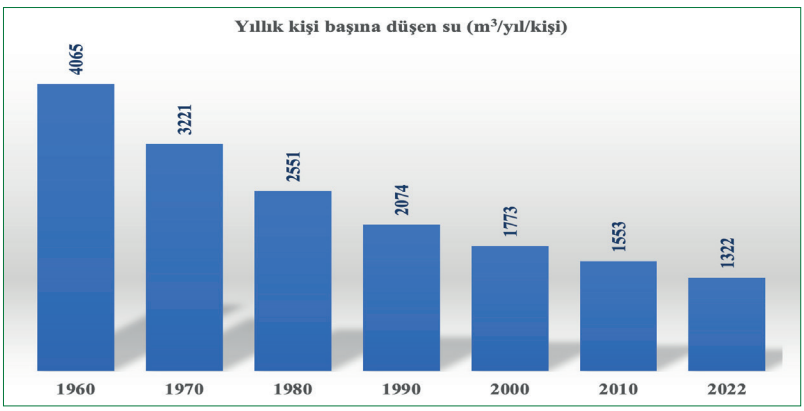
OECD (2012), 2050 yılında su kullanımında 2000 yılına göre %50 artış olacağını öngörmektedir. Bununla birlikte, 2021 yılı verilerine göre dünya genelinde 2 milyar kişi dönemsel ya da sürekli su kıtlığı yaşamaktadır (United Nations, 2021). Ayrıca, iklim değişikliğinin de etkisiyle su varlığındaki dönemsel değişimlere bağlı olarak su arzı daha kararsız ve belirsiz olmakta ve su arz güvenliğinin sağlanması zorlaşmaktadır.

## 3. Türkiye'de Su Kaynaklarının Durumu

Türkiye'nin yıllık toplam yağış miktarı 450 milyar $m^3$, yıllık ortalama alansal yağış miktarı ise 574 mm'dir. Yıllık ortalama yüzey akış miktarı (doğal akım) 185 milyar $m^3$'tür. Bununla birlikte, yıllık kullanılabilir yerüstü suyu miktarı 94 milyar $m^3$, yeraltı suyu emniyetli rezervi 18 milyar $m^3$, yıllık toplam kullanılabilir su miktarı ise 112 milyar $m^3$'tür. Buna göre Türkiye'nin 2022 yılı kişi başına düşen su miktarı 1.322 $m^3$'tür. Bu değer, Falkenmark indeksine (Falkenmark, 1989 aktaran Brown ve Matlock, 2011) göre değerlendirildiğinde ülkemizin su stresi yaşayan ülkeler arasında olduğunu göstermektedir. Falkenmark indeksi limitleri Tablo 1'de yer almaktadır.

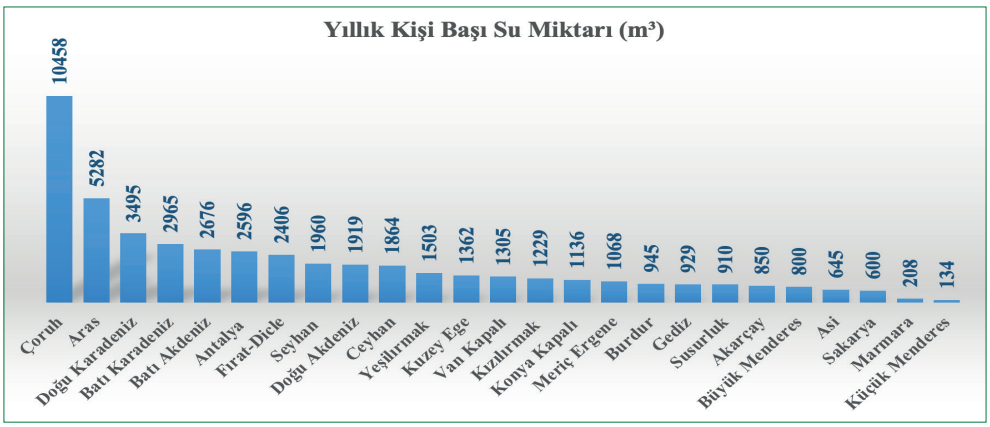
Bununla birlikte, Türkiye'nin yıllık kişi başına düşen su miktarının 1960 yılından 2022 yılına kadar olan değişimi Şekil 2'de gösterilmektedir.

Şekil 2'de anlaşıldığı üzere, nüfus artışı, sanayileşme, tarımsal üretimdeki artış, su kullanım alışkanlıklarındaki değişimler ve iklim değişikliği etkisiyle yağışların azalması neticesinde, Türkiye'nin kişi başına düşen yıllık su varlığı yıllar içinde ciddi oranda azalmıştır. Bu durum, su kaynakları yönetiminde iklim değişikliğine uyumu artıracak politikalara ihtiyaç duyulduğunu gözler önüne sermektedir. Diğer taraftan, ülke genelinde yağışlar ve su potansiyeli, nüfus yoğunluğu ve su ihtiyacı ile orantılı olarak dağılmamaktadır. Nüfusun, tarımsal ve endüstriyel faaliyetlerin yoğun olmadığı Doğu Karadeniz Bölgesinde yağışlar ve su potansiyeli yüksekken, üretim faaliyetleri ile nüfusun yoğun olduğu Ege ve Marmara Bölgelerinde su potansiyeli düşüktür. Türkiye'nin 25 su havzasında kişi başına düşen su miktarının dağılımı Şekil 3'te gösterilmektedir.




***Şekil 2.*** *Türkiye'de kişi başına düşen su miktarının yıllara göre değişimi*

Şekil 3'te görüldüğü üzere Marmara ve Küçük Menderes Havzaları mutlak su kıtlığı kategorisinde olup, kişi başına düşen su miktarı oldukça düşük seviyelerdedir. Sanayi faaliyetleri ile tarımsal üretim açısından önemli bölgeler olan Burdur, Gediz, Susurluk, Akarçay, Büyük Menderes, Asi ve Sakarya Havzalarında da kişi başına düşen su miktarının su kıtlığı seviyesinde olduğu görülmektedir.




***Şekil 3.*** *Havzalarda yıllık kişi başına düşen su miktarı*

Bununla birlikte, 2022 yılı verilerine göre Türkiye genelinde tahsis edilen yeraltı suyu toplam miktarı yaklaşık 17,80 milyar $m^3$'tür. Bu suyun %64'ü tarımsal sulama, %24'ü içme-kullanma, %9'u ise sanayi maksatlı kullanılmakta olup, emniyetli rezervin neredeyse tamamı hâlihazırda tahsis edilmiş durumdadır. Mevcut yerüstü suyu potansiyelinin ise %43'ü tahsis edilmiş durumdadır. 2022 yılında kullanılan yerüstü suyu miktarı yaklaşık 41 milyar $m^3$'tür. Tahsis edilen yerüstü ve yeraltı suları toplamının %77'si tarımsal sulamada, %23'ü ise içme-kullanma ve sanayi sektörlerinde kullanılmaktadır.

## 4. İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkileri

Literatürde, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaların birçoğu iklim değişikliğinin bölgesel etkileri üzerine odaklanmaktadır (Abbaspour vd., 2009; Görgüner vd., 2019; Piao vd., 2010). Ancak, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkileri, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) 2022 yılında yayımlanan raporunda geniş bir kapsamda ele alınmaktadır. Buna göre, kabaca dünya nüfusunun yarısının-8 milyar kişi- en azından yılın bir bölümünde iklimsel ya da iklimsel olmayan nedenlere bağlı olarak ciddi su sıkıntısı çekeceği tahmin edilmektedir. 1970'li yıllardan günümüze, tüm afetlerin %44'ü taşkınlar ile ilişkilidir. Bununla birlikte, iklim değişikliğine uyum çalışmalarının %60 gibi büyük bir kısmı su kaynaklı zararlar ile ilgilidir. Ayrıca, iklim değişikliği nedeniyle hidrolojik döngüde ortaya çıkan yoğunlaşma, diğer sosyoekonomik faktörlere bağlı olarak oluşan mevcut su sıkıntılarını daha da vahim bir hale getirmektedir. Yaklaşık yarım milyar insan alışılmadık seviyede -uzun dönem ortalama yağışların eskiye kıyasla yalnızca 6 yılda bir görülen seviyede yüksek olduğu- yağışlı alanlarda yaşamaktadır. Diğer taraftan, 163 milyon insan ise alışılmadık seviyede kurak bölgelerde yaşamaktadır.

Şiddetli yağışların yoğunluğu dünyanın birçok bölgesinde 1950'li yıllardan itibaren artmıştır. Yıllık maksimum bir günlük yağış şiddetinin düştüğü bölgelerde yaşayan insan sayısına kıyasla (yaklaşık 86 milyon kişi), yıllık maksimum bir günlük yağış şiddetinin arttığı bölgelerde yaşayan insan sayısı (yaklaşık 709 milyon kişi) çok daha fazladır. Aynı zamanda, 1950'den beri, daha uzun kurak dönemlerin yaşandığı bölgelerde yaşayan insan sayısı (yaklaşık 700 milyon kişi), daha kısa kurak dönemlerin yaşandığı bölgelerde yaşayan insan sayısından fazladır. Yüksek derece kuzey enlemlerinde akarsu akışlarında açık bir artış eğilimi olduğu gözlemlenmektedir. Bunun yanı sıra, yoğun yağışlar ve taşkın olayları neticesinde tropik bölgelerde yer alan akiferlere daha fazla dönemsel besleme olduğu belirlenmiştir. İnsan kaynaklı iklim değişikliğinin etkisiyle, etkili taşkınlara ve kuraklıklara neden olan aşırı hava olaylarının ortaya çıkma sıklığı ve şiddeti artmaktadır.

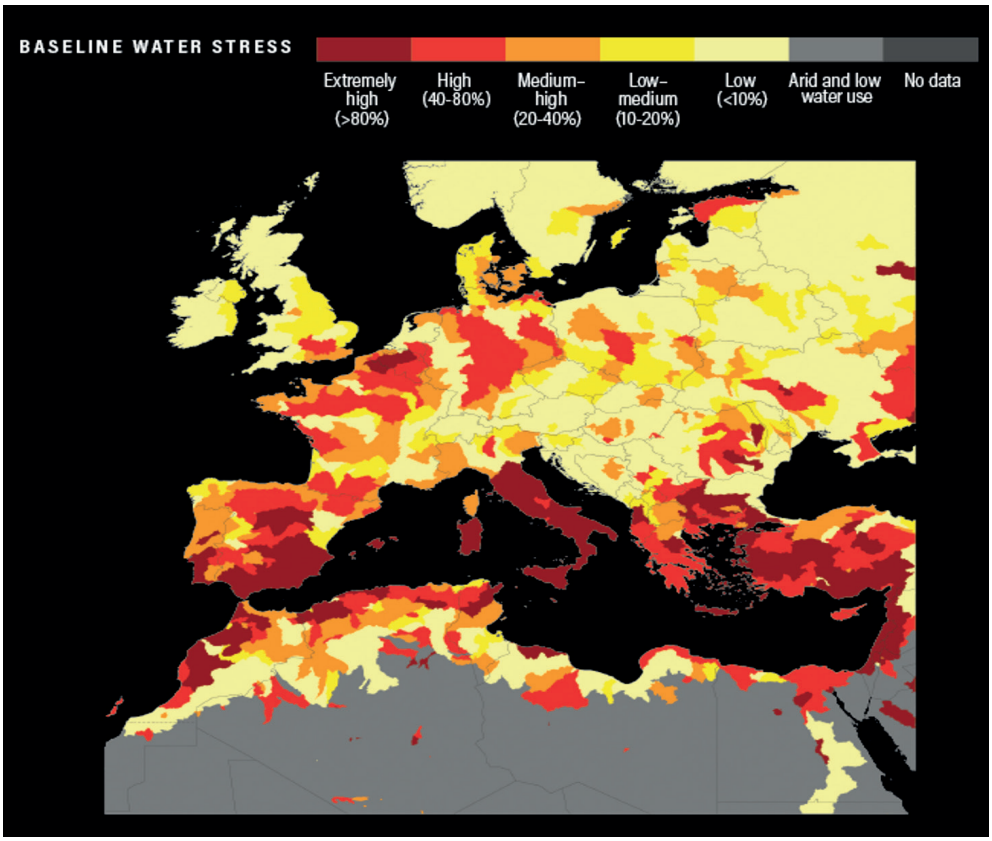
İnsan kaynaklı iklim değişikliği, özellikle tarımsal ve hidrolojik kuraklıkların meydana gelme ihtimalini ve şiddetini artırmıştır. 1970 ve 2019 yılları arasında dünya genelinde meydana gelen afetlerin %7'si, afet kaynaklı ölümlerin (çoğunluğu Afrika kıtasında) %34'ü ise kuraklık kaynaklıdır. Batı Avrupa, Çin, Japonya, ABD, Peru, Brezilya ve Avustralya'da yaşandığı gibi

yakın dönemde dünya genelinde ciddi taşkınlara neden olan aşırı yağış olaylarının sıklığı insan kaynaklı iklim değişikliğinin etkisiyle artmaktadır. Son 40-60 yılda yaşanan ısınmaya bağlı olarak, her 10 yılda bir bahar taşkınlarının 10 gün öne geldiği ortaya konulmuştur. 1970-2019 yılları arasında ortaya çıkan ekonomik kayıpların %31'ine taşkınlar sebep olmuştur. İklim değişikliğinin insanlar ve ekosistem üzerindeki olumsuz etkilerinin, kırılgan topluluklarca daha fazla hissedildiği değerlendirilmektedir. Diğer taraftan, tarımsal üretim ve enerji üretiminin de hidrolojik döngüdeki olumsuz değişikliklerden etkilendiği yadsınamaz bir gerçektedir. 1983-2009 yılları arasında, dünya genelinde ekilen alanların 4'te 3'ünde (yaklaşık 454 milyon hektar) meteorolojik kuraklık nedeniyle rekolte kaybı yaşanmış olup, toplam üretim kaybının ekonomik değeri 166 milyar dolara ulaşmaktadır. Bununla birlikte, 1980'den bu yana elde edilen uzun dönemli verilere göre küresel termoelektrik ve hidroelektrik enerji üretimi, tesis yararlanım oranlarının kuraklık nedeniyle %4-5 oranında düşmesi neticesinde azalmıştır. İklim değişikliği, tatlı su ekosistemlerini de olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, aşırı yağışlar ve aşırı hava olayları, su kaynaklı salgın hastalıkların sıklığını artırmaktadır. Suya bağlı zararlarda ortaya çıkan değişimler, özellikle güney yarım kürede yaşayan yoksullar, kadınlar, çocuklar, yerel halk ve yaşlılar gibi kırılgan grupları, tarihsel, sosyo-ekonomik ve politik şartlara bağlı mevcut sistemsel eşitsizlikler nedeniyle daha fazla etkilemektedir (IPCC, 2022).

Birleşmiş Milletler tarafından 2020 yılında yayımlanan Dünya Su Gelişim Raporu'na göre iklim değişikliği etkisiyle dünya genelinde dönemsel su kıtlığı yaşanma ihtimali ve ısı dalgaları, daha önce görülmemiş şiddette yağışlar, fırtınalar ve fırtına dalgası gibi aşırı hava olaylarının görülme sıklığının artacağı tahmin edilmektedir. Diğer taraftan, iklim değişikliği etkisi ile su ısısı yükselecek, çözünmüş oksijen seviyeleri düşecek ve buna bağlı olarak tatlı su ekosistemlerinin özümleme kapasiteleri azalacaktır. Bu nedenle, iklim değişikliği su kalitesi üzerinde de olumsuz etkilere sahiptir. Bunun yanı sıra iklim değişikliği, taşkınlar sonucu kirletici ve patojenlerin su kaynaklarına taşınımı ile kuraklık dönemlerinde artan kirletici konsantrasyonları gibi su kalitesi sorunlarına da neden olabilmektedir. İklim değişikliği orman ve sulak alan ekosistemlerini de etkilemektedir. Ekosistemlerin zarar görmesi yalnızca biyoçeşitliliğin azalmasına değil suların temizlenmesi, karbon yakalama ve depolama, doğal taşkın koruma ile tarım, su ürünleri üretimi ve rekreasyon için su temini gibi su ile ilişkili ekosistem hizmetlerinin sürdürülmesini de etkileyecektir (UNESCO, UN-Water, 2020).

## 5. İklim Değişikliğinin Türkiye'de Su Kaynaklarına Etkileri

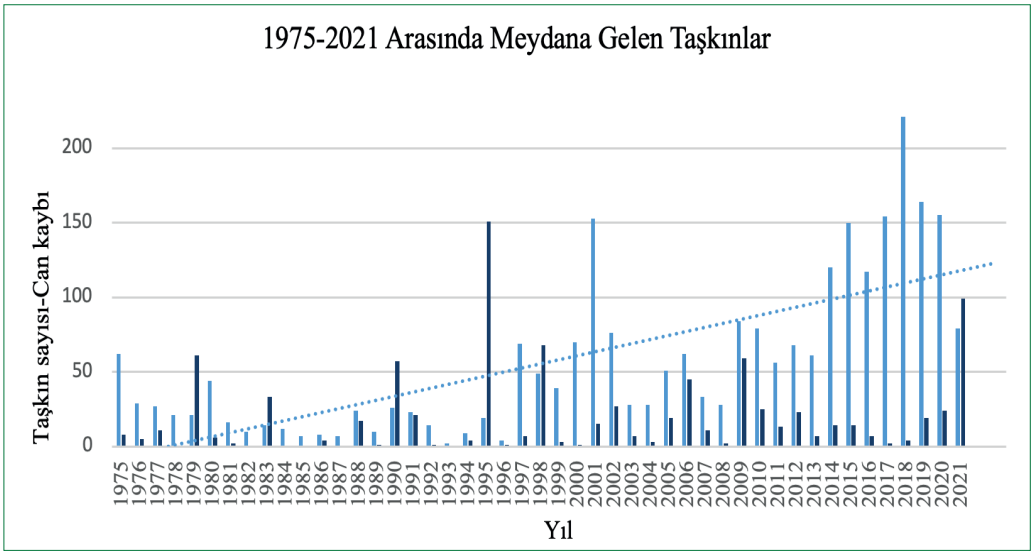
Türkiye, iklim değişikliği etkilerinden yoğun olarak etkileneceği tahmin edilen Akdeniz iklim kuşağında yer almaktadır. "Taban su stresi", yıllık toplam su çekimlerinin, yıllık kullanılabilir su miktarına oranı olarak tanımlanmaktadır (Hofste vd., 2019a). Türkiye'nin de içerisinde yer aldığı Orta Doğu ve Kuzey Afrika'nın dünya üzerinde taban su stresinin en şiddetli yaşanacağı bölgeler olduğu tahmin edilmektedir (Hofste vd., 2019b). Şekil 4'te Orta Doğu'da ve Kuzey Afrika'da taban su stresi seviyesi gösterilmektedir.




***Şekil 4.*** *Orta Doğu ve Afrika bölgelerinde taban su stresi seviyesi (Hofste vd., 2019b)*

İklim değişikliğinin etkisi ile Türkiye'de su stresinin daha da artacağı tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, değişen iklim koşulları nedeniyle nehir havzalarının da birçok riskle karşı karşıya kalacağı tahmin edilmektedir. Bunlardan birisi, ülkenin iç ve güney kesimlerinde, özellikle de Fırat-Dicle Havzası'nda yağışların azalmasıdır. Diğeri ise özellikle kış mevsiminde olmak üzere ortalama sıcaklıkların artmasıdır. Ortalama sıcaklıkların artması neticesinde kış boyunca alınan yağışlar kardan çok yağmur şeklinde oluşur. Bu da yıl boyu su kaynaklarını besleme potansiyeline sahip kar örtüsünün azalmasına neden olmaktadır. Sıcaklıkların yükselmesi aynı zamanda bahar aylarında karların daha erken erimesine neden olmaktadır. İklim değişikliğine bağlı bir diğer etki ise Kuzey ve Batı Anadolu'da yaz döneminde yağışların artmasıdır.

Artan yağışlara bağlı olarak bu bölgelerde taşkınların yaşanma ihtimali de artmaktadır (Demircan vd., 2017, s. 36). Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü verilerine göre Türkiye'de 1975-2021 yılları arasında yaşanan taşkınların ve buna bağlı can kayıplarının sayısı Şekil 5'te gösterilmektedir.




***Şekil 5.*** *Türkiye'de 1975-2021 yılları arasında meydana gelen taşkınlar ve can kaybı sayısı*

Şekil 5 incelendiğinde, taşkınların oluşumunda artış eğilimi olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumda, iklim değişikliğine bağlı olarak yağış rejiminin değişmesi ile yağışların süre ve şiddetinin artmasının etkisi büyüktür. Diğer taraftan, iklim değişikliğine bağlı olarak kuraklıkların da süresi ve şiddetinin artması suyun depolanmasının önemini ve depolama tesislerine duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Gediz Havzası'nda yer alan Demirköprü Barajı giriş akımları ve depolanan su hacmi üzerinde iklim değişikliği etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada, giriş akımlarının geçmiş yıllara göre artacağı tahmin edilse de 21. yüzyıl boyunca iklim değişikliği etkisi ile azalacağı değerlendirilmektedir (Görgüner vd., 2019). Bu bulgu, yeni depolama tesislerine duyulan ihtiyacı kanıtlar niteliktedir.

Diğer taraftan, Türkiye genelinde kuraklık oluşumu ihtimalinin SPI (Standart Precipitation Index) değerleri üzerinden değerlendirildiği bir çalışmada, Akdeniz kıyı kesimi ile Suriye sınır hattının SPI değerlerinin sıfırdan küçük olma ihtimalinin, diğer bir deyişle bu alanların kurak olma ihtimalinin %50'den yüksek olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, aynı bölgelerin aşırı kurak (SPI≤-2) olma ihtimalinin ülkenin diğer kısımlarından yüksek olduğu bulunmuştur. Akçakale ve Harran ovalarının, aşırı kuraklık yaşanma ihtimali en yüksek alanlar olduğu tespit edilmiştir. Aşırı kuraklık durumunun yaşanma ihtimali güney ve doğu bölgelerden kuzeye doğru azalmaktadır (Türkeş, 2020). Türkeş (2017) tarafından yapılan bir çalışmada 81 ilin kuraklığa karşı kırılganlığı "Sosyal Kırılganlık Endeksi (SVI)" kullanılarak analiz edilmiştir. Buna göre, kuraklığa karşı kırılganlığı en düşük olan illerin Trakya Bölgesi'nde Edirne ve Kırklareli, Batı Karadeniz Bölgesi'nde Bilecik, Bolu, Karabük, Zonguldak ve Bartın, Doğu Karadeniz Bölgesi'nde Giresun, Trabzon, Rize ve Artvin, Doğu Anadolu Bölgesi'nde ise Erzincan, Bayburt, Tunceli, Elazığ, Erzurum ve Ardahan olduğu belirlenmiştir.

Kuraklığa karşı kırılganlığı en yüksek olan illerin ise İstanbul ve çevre illeri, Bursa, Afyonkarahisar, İzmir, Antalya, Adana, Hatay, Kahramanmaraş ve Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan illerin neredeyse tamamı olduğu tespit edilmiştir. Diğer bir çalışmada ise, 81 il için "Kuraklık Zarar ve Afet Riski" SPI değerleri kullanılarak analiz edilmiştir (Türkeş, 2017). Bu çalışmanın çıktılarına göre, "Kuraklık Zarar ve Afet Riski" en yüksek olan il İzmir olmakla birlikte, en yüksek skoru alan iller Ege Bölgesi'nde Manisa, Aydın, Muğla, Akdeniz Bölgesi'nde Antalya, Mersin, Adana, Osmaniye ve Kahramanmaraş, Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nde Şanlıurfa, Diyarbakır, Mardin, Kilis, Gaziantep, Adıyaman, Siirt ve Batman, Doğu Anadolu Bölgesi'nde Hakkari, Van ve Muş, İç Anadolu Bölgesi'nde Ankara, Eskişehir, Konya, Aksaray, Karaman, Niğde ve Kayseri, Marmara Bölgesi'nde ise İstanbul, Çanakkale ve Balıkesir'dir.

Türkiye'de yağışın değişiminin incelendiği bir çalışmada, 2021-2050 periyodunda oluşabilecek yağışlar 1971-2000 periyoduna kıyasla, IPCC RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları baz alınarak tahmin edilmiştir (Türkeş vd., 2020). Buna göre, 2021-2050 döneminde Türkiye'nin özellikle güneybatı bölgelerinde kış yağışlarının önemli ölçüde azalacağı öngörülmektedir. Diğer taraftan, ülkenin kuzey kesimlerinde ise yağışların artacağı tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, RCP4.5 senaryosuna göre ülkenin batı ve güney kesimlerinde yağışlı gün sayısının yakın bir zamanda ortalama 20 gün kadar düşmesi beklenmektedir. Karadeniz kıyı kesiminde ise yağışlı gün sayısının en az 10 gün artması öngörülmektedir. RCP8.5 senaryosuna göre ise ülke genelinde yağışlı gün sayısının düşmesi beklenmektedir. Yağışlı gün sayısındaki en önemli düşüşün ise Orta Toroslar Bölgesi olacağı tahmin edilmektedir. Bunun yanı sıra, RCP4.5 senaryosuna göre, ülke genelinde yıllık ortalama maksimum günlük yağışların 5 mm/gün kadar düşeceği öngörülmektedir. Bu düşüşün en çok Trakya, kıyı Ege ve Akdeniz Bölgelerinde olacağı değerlendirilmektedir. RCP8.5 senaryosuna göre ise, yıllık ortalama maksimum günlük yağışların Karadeniz kıyı şeridinde az miktarda artacağı, ülkenin diğer kesimlerinde ise ortalama 2 mm/gün kadar düşeceği tahmin edilmektedir.

Bununla birlikte, Türkiye genelinde iklim değişikliği etkilerinin Aridite İndisi üzerinden değerlendirildiği bir çalışmada, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre Türkiye'nin yakın gelecekte daha kurak olacağı değerlendirilmektedir (Türkeş, 2020, s. 483). Bu çalışmanın bulgularına göre, Türkiye'nin geçmişte yarı kurak olan bölgelerinin yakın zamanda biraz genişleyeceği ve İç Anadolu, Güneydoğu Anadolu ve Ege Bölgesi'nin iç kesimlerinde 2021-2050 döneminde yarı kurak ve kurak yarı-nemli iklim şartlarının hüküm süreceği tahmin edilmektedir. Ayrıca, iklim değişikliğinin etkisiyle, çölleşmeye yatkın araziler genişlerken, çölleşmeye yatkın olmayan arazilerin ise küçüleceği öngörülmektedir.

Yukarıda zikredilen veriler, su kaynaklarının planlanmasında hayati öneme sahiptir. Su kaynakları planlaması ise gerek gıda gerekse enerji arz güvenliği ve su güvenliğinin sağlanmasının temelidir. Bu nedenle, iklim değişikliğinin yağış rejimi üzerindeki etkileri detaylı olarak analiz edilmeli ve bu çalışmalar yaygınlaştırılmalıdır.

## 6. Su Kaynakları Yönetiminde İklim Değişikliğine Uyum Çalışmaları

Türkiye'de iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki en önemli etkilerini yağış rejimlerindeki değişikliklere bağlı olarak şiddeti ve sıklığı artan kuraklık ve taşkın olayları oluşturmaktadır. Bu kapsamda, Türkiye'de su kaynaklarının yönetimi bakımından iklim değişikliğine uyum ve dayanıklılığın artırılması çalışmalarının temelini Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) tarafından yapılan faaliyetler oluşturmaktadır. Bu faaliyetler temel olarak arz yönetimi ve talep yönetimi başlıkları altında değerlendirilebilir.

Arz yönetimi, kurak dönemlerde su temininin devamlılığının sağlanması amacıyla su arzının artırılmasına yönelik olarak depolama kapasitesinin artırılması ile sulama tesislerinin ve içme suyu arıtma tesislerinin inşası ve arıtılmış atıksuların yeniden kullanımına ilişkin çalışmaları kapsamaktadır. DSİ'nin faaliyete başladığı 1954 yılından günümüze toplamda maksimum 183 milyar $m^3$ kapasiteye ulaşan depolama tesisleri inşa edilmiştir. 2025 yılı sonuna kadar işletmeye alınacak tesisler ile depolama hacminin 8,0 milyar $m^3$ artırılması hedeflenmektedir. Bunun yanı sıra, inşa edilen yeraltı suyu suni besleme tesisleri ile su kaynaklarının bankası işlevi gören ve kuraklık dönemlerinde hızlı ve güvenli içme suyu temini sağlayabilecek yeraltı suyu kaynakları da iyileştirilmektedir. Hâlihazırda işletmeye alınan 101 adet tesis ile 33 milyon $m^3$'lük ilave depolama ve 20 milyon $m^3$'lük ilave içme suyu sağlanmıştır.

Bununla birlikte, DSİ tarafından inşa edilen içme suyu arıtma tesisleri ile 5 milyar $m^3$ içme suyu arıtılmakta ve 49 milyon kişiye hizmet verilmektedir. Diğer taraftan, alternatif su kaynakları oluşturulması kapsamında atıksuların sulamada yeniden kullanımının araştırılmasına yönelik proje çalışmaları sürdürülmektedir.

Talep yönetimi ise su talebinin optimum seviyede tutulmasına yönelik akım tahmin ve baraj işletme çalışmaları, optimum su tahsisi ve arazi toplulaştırma çalışmaları ile su verimliliğinin artırılmasına yönelik olarak tarımsal sulamada su kaybını azaltan modern sulama sistemlerinin yaygınlaştırılması çalışmalarını kapsamaktadır. Bu amaçla, işletmede olan tüm barajlar için işletme planları hazırlanarak su kaynaklarının çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan en uygun şekilde tahsisi ve kullanımının sağlanması amaçlanmaktadır. Ayrıca, DSİ tarafından yapılan arazi toplulaştırma çalışmaları neticesinde tarım arazilerinde %2 arazi kazanımı, yakıt ve ilaçlamadan tasarruf ve yapılan tarla içi geliştirme hizmetleri ile verim artışı sağlanmaktadır. 1954-2022 yılları arasında 6,77 milyon hektar tarım alanında toplulaştırma işlemleri tamamlanmıştır. 2023 yılında ise ilave 1,06 milyon hektar alanın toplulaştırılması hedeflenmektedir.

Ayrıca, ilk etapta 1 milyon hektar eski tip sulama sistemlerinin yağmurlama sulama ve damla sulama sistemleri gibi sulama randımanı yüksek (sırasıyla %70-75 ve %90) sistemlere modernizasyonu ile 5 milyar $m^3$ su tasarrufu sağlanabilecektir. Türkiye'de 2003 yılı öncesinde basınçlı borulu sistemlerle tarım yapılan alanlarının oranı %6 iken, bu oran 2003 sonrası DSİ tarafından yapılan yatırımlar ile %31'e çıkarılmıştır. Yapılacak çalışmalar ile bu oranın daha da artırılması hedeflenmektedir.

Diğer taraftan, iklim değişikliğine uyum çalışmalarının önemli bir bölümünü ise taşkın ve rüsubat kontrolü çalışmaları oluşturmaktadır. Bu kapsamda, 2022 yılı sonu itibariyle, 68 adedi taşkın maksatlı depolama tesisi, 10.332 adedi taşkın kontrol tesisi olmak üzere toplam 10.400 adet tesis inşa edilerek işletmeye alınmış ve yaklaşık 2 milyon hektar üzeri alanda taşkın kontrolü sağlanmış, afet riskleri azaltılmıştır.

Yukarıda özetlenen iklim değişikliğine uyum ve dayanıklılık çalışmalarının yanı sıra DSİ tarafından inşa edilen hidroelektrik santraller ve güneş enerjisi santralleri, yenilenebilir enerji üretimini artırarak iklim değişikliği azaltım çabalarına önemli katkı sağlamaktadır. 2022 yılı verilerine göre Türkiye'de faaliyette olan hidroelektrik santrallerin toplam kurulu gücü 31.712 MW, enerji üretimindeki oranı ise %31'dir. İnşa edilecek yeni tesisler ile toplam kurulu gücün 2030'a kadar 40.000 MW'a çıkarılması hedeflenmektedir. Ayrıca, su kaynakları üzerine kurulacak yüzer güneş enerji santralleri ile de yenilenebilir enerji üretimi artırılarak fosil yakıt tüketiminin ve sera gazı emisyonlarının azaltılmasına destek olunması hedeflenmektedir.

Tüm bu çalışmalar ile iklim değişikliğine bağlı olarak su arzında yaşanabilecek kararsızlıkların azaltılması, su arz güvenliğinin sağlanması ve böylece iklim değişikliğinin gıda ve enerji arz güvenliği üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması amaçlanmaktadır. Bu çalışmaların yanı sıra Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü tarafından havza bazında hazırlanan Kuraklık Yönetim Planları ve Taşkın Yönetim Planları ile kuraklık ve taşkın risklerinin azaltılmasında alınacak tedbirler belirlenmektedir. Bununla birlikte, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü tarafından gerçekleştirilen projeler ile iklim değişikliğinin su kaynakları üzerinde olası etkileri, çeşitli iklim değişikliği senaryoları altında değerlendirilmiştir. Ayrıca, belediye şebekelerinde su kayıp ve kaçaklarının azaltılması amacıyla da çalışmalar Su Yönetimi Genel Müdürlüğü'nce sürdürülmektedir.

## 7. Sonuç ve Öneriler

Farklı iklim değişikliği senaryoları çerçevesinde, iklim değişikliğinin su kaynaklarına etkilerinin boyutları birbirinden farklı olsa da iklim değişikliğinin su kaynakları üzerinde olumsuz etkilere neden olduğu ve bu etkilerin git gide daha fazla hissedileceği yadsınamaz bir gerçektir. Tüm dünyada yaşanan ekonomik sorunlar ve savaşlar da iklim değişikliği etkilerinin daha fazla hissedilmesine neden olmakta, ulusal ve uluslararası politikaların ve kalkınma planlamalarının geliştirilmesinde su-gıda-enerji ekseninin önemini artırmaktadır. Bu nedenle, su kaynakları yönetiminde de iklim değişikliğine uyum, dayanıklılık ve azaltım çalışmalarının da ivme kazanması gerekmektedir.

Bu kapsamda, Türkiye'de öncelikle su yönetiminde arz ve talep yönetiminin birlikte ele alınmasını sağlayacak;

- Bütüncül
- Katılımcı
- Havza ölçekli
- Veriye dayalı

yeni bir su yönetimi politikasının ortaya konulması ve uygulanması elzemdir.

Bunun yanında, yağışlı dönemlerde suyun teknik olarak mümkün olan en üst seviyede depolanmasını sağlayacak yatırımların hayata geçirilmesi ile kurak dönemlerde su arz güvenliğinin sağlanması, öncelikle yerüstü sularının tahsisi ile yeraltı sularının "su kaynaklarının bankası" olarak korunması ve ancak yerüstü sularının kullanımının yetersiz kaldığı durumlarda yeraltı suyu kullanımına izin verilmesi, suyun taştığı yerde değil düştüğü yerde tutulması anlayışıyla, taşkın yönetiminde üst havza tedbirlerinin alt havza tedbirleri ile birlikte uygulanması, su kayıp kaçaklarının azaltılması ile ülke genelinde tüm sektörlerde kabul edilebilir seviyelere çekilmesi ve su verimliliğinin artırılması, alternatif su kaynaklarının kullanımının özendirilmesi ve teşviki önem arz etmektedir.

Bununla birlikte, su kaynaklarının miktar ve kalitesinin düzenli olarak ölçülmesi ile suya ilişkin verilerin iyileştirilmesi, böylece planlama ve projeler ile projeksiyonların kalitesinin artırılması, havza su bütçelerinin oluşturulması ve tüm havzalarda hidrolojik dengenin sağlanması gerekmektedir.

Ayrıca, mutlak su kıtlığı yaşanan Marmara ve Küçük Menderes Havzaları öncelikli olarak ele alınmak üzere, su kıtlığı olan havzalarda kısa vadede alınabilecek tedbirler hızlıca belirlenmeli ve hayata geçirilmelidir. Su baskısı altında olan havzalarda ise kişi başına düşen su miktarının artırılmasına yönelik orta ve uzun vadeli tedbirler ortaya konulmalıdır.

Diğer taraftan, iklim değişikliği etkilerinin daha yüksek doğrulukla tahmin edilebilmesi için kamu kurumları ve üniversitelerin işbirliği ile bilimsel çalışmalar yürütülmelidir. Bu çalışmalar ile iklim değişikliğinin havza bazlı etkileri irdelenmeli, kamu kurumlarının yürüteceği planlama çalışmalarına güvenilir altlıklar oluşturulması sağlanmalıdır.

**Teşekkür**

Türkiye'nin su kaynakları ve yatırımlarına ilişkin verilerin elde edilmesi ve derlenmesinde emeği geçen Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü ve Bölge Müdürlüklerinde görevli tüm personele teşekkür ederiz.

## 8. Kaynaklar / References


Abbaspour, K. C., M. Faramarzi, S. S. Ghasemi, & H. Yang (2009), Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resour. Res.*, 45, W10434, doi:10.1029/2008WR007615.

Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu & J.P. Palutikof, Eds. (2008). *Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.

Boretti, A., & Rosa, L. (2019). Reassessing the projections of the world water development report. *NPJ Clean Water*, 2(1), 1-6.

Brown, A. & Matlock, M.D. (2011). *A Review of Water Scarcity Indices and Methodologies.* White Paper #106. The Sustainability Consortium.

Demircan, M., Gürkan, H. , Eskioğlu, O. , Arabacı, H. & Coşkun, M. (2017). Climate change projections for Türkiye: three models and two scenarios. *Turkish Journal of Water Science and Management*, 1 (1), 22-43. doi: 10.31807/tjwsm.297183

Faramarzi, M., Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., Farzaneh, M. R., Zehnder, A. J., Srinivasan, R., & Yang, H. (2013). Modeling impacts of climate change on freshwater availability in Africa. *Journal of Hydrology*, 480, 85-101.

Gorguner, M., Kavvas, M. L., & Ishida, K. (2019). Assessing the impacts of future climate change on the hydroclimatology of the Gediz Basin in Türkiye by using dynamically downscaled CMIP5 projections. *Science of the Total Environment*, 648, 481-499.

Hofste, R., S. Kuzma, S. Walker, E.H. Sutanudjaja, et al. (2019a). *Aqueduct 3.0: Updated Decision Relevant Global Water Risk Indicators. Technical Note*. Washington, DC: World Resources Institute. Erişim adresi: https://www.wri.org/publication/aqueduct-30 Erişim tarihi: 16.02.2023

Hofste, R., Reig, P., Schleifer, L. (2019b). *17 Countries, Home to One-Quarter of the World's Population, Face Extremely High Water Stress*. World Resources Institute. Erişim adresi: https://www.wri.org/insights/17-countries-home-one-quarter-worlds-population-face-extremely-high-water-stress Erişim tarihi: 16.02.2023

Kotwicki, V. (2009). Water balance of Earth / Bilan hydrologique de la Terre. *Hydrological Sciences Journal*, 54(5), 829-840, DOI: 10.1623/hysj.54.5.829

*IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

OECD. (2012). *OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction. Key Facts and Figures*. Paris, OECD Publishing. www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/49910023.pdf.

Oki, T., & Kanae, S. (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Science*. 13(5790), 1068-1072.

Piao, S., Ciais, P., Huang, Y., Shen, Z., Peng, S., Li, J., Ma, Y., Ding, Y., Friedlingstein, P., Liu, C., Tan, K., Yu, Y.,Zhang, T., & Fang, J. (2010). The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 467(7311), 43-51.

Shiklomanov, I.A. (2000). Appraisal and assessment of world water resources, *Water International*, 25(1), 11-32.

Türkeş, M. (2020). Climate and Drought in Türkiye. *Water resources of Türkiye* (ss. 85-125). Springer, Cham.

Türkes, M., Turp, M. T., An, N., Ozturk, T., & Kurnaz, M. L. (2020). Impacts of Climate Change on Precipitation Climatology and Variability in Türkiye. *Water resources of Türkiye* (ss. 467-491). Springer, Cham.

UNESCO-WWAP. (2006). The United Nations World Water Development Report 2: Water A Shared Responsibility. Paris, UNESCO.

UNESCO, UN-Water, (2020). United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change, Paris, UNESCO.

United Nations. (2021). The United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water. UNESCO, Paris.

UN Environment (2019). Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People. Nairobi. DOI 10.1017/9781108627146.

UN-Water. (2021). Summary Progress Update 2021 – SDG 6 – water and sanitation for all. Version: July 2021. Geneva, Switzerland.

USGS. (2019). *All of Earth's water in a single sphere*. Retrieved on 27.07.2022 from: https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/how-much-water-there-earth

## Yazarlar Hakkında / About Authors

**Esra ŞILTU | Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü |**
**esrasiltu[at]dsi.gov.tr | ORCID: 0000-0003-2541-953X**
Esra Şıltu, kamu sektöründe 10 yılı aşkın deneyime sahip kıdemli bir çevre mühendisi ve su kalitesi uzmanıdır. Lisans derecesini 2011 yılında, yüksek lisans derecesini ise 2014 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden almıştır. Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü'nde uzman olarak çalışmış ve halen Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'nde görev yapmaktadır. Su kalitesi uzmanı olarak, su kaynaklarında ortaya çıkan kimyasalların araştırılması, su kirliliğinin önlenmesi ve kontrolü konularında birçok projede görev almıştır. Aynı zamanda Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde doktora adayıdır. Çalışmaları su kalitesi, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkisi, su politikasının geliştirilmesi konularına odaklanmaktadır.

**Esra ŞILTU | General Directorate of State Hydraulic Works |**
**esrasiltu[at]dsi.gov.tr | ORCID: 0000-0003-2541-953X**
Esra Şıltu is a senior environmental engineer and water quality expert with more than 10 years of experience in government sector. She got his B.S. degree in 2011 and M.Sc. degree in 2014 from Environmental Engineering Department of Middle East Technical University. She worked as an expert in DG Water Management in the Ministry of Agriculture and Forestry and she is currently working in General Directorate of State Hydraulic Works. As a water quality expert, she participated in many projects on investigation of emerging chemicals in water resources, prevention and control of water pollution. She is also a PhD candidate in Middle East Technical University, Ankara Türkiye. Her studies focuses on water quality, impact of climate change on water resources, development of water policy.

**Prof. Dr. Lütfi AKCA | Türkiye Su Enstitüsü |**
**lutfiakca[at]dsi.gov.tr | ORCID: 0000-0003-4098-9442**

Prof. Akça, lisans derecesini 1981 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden, yüksek lisans ve doktora derecelerini ise sırasıyla 1983 ve 1986 yıllarında İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden almıştır. Su kaynaklarının geliştirilmesi, entegre su kaynakları yönetimi, su ve atıksu arıtımı konularında 40 yıllık deneyime sahiptir. 2007-2010 yılları arasında Çevre Yönetimi Genel Müdürü, 2010-2011 yılları arasında Çevre ve Orman Bakanlığı Müsteşarı olarak görev yapmıştır. Ardından 2011-2016 yılları arasında Orman ve Su İşleri Bakanlığı Müsteşarı Müsteşarı, 2022 yılında Devlet Su İşleri Genel Müdürü olarak görev yapmıştır. Halen Türkiye Su Enstitüsü Başkanlığı görevini yürütmektedir. Ayrıca 2018-2023 yılları arasında T.C. Cumhurbaşkanlığı Yerel Yönetim Politikaları Kurulu üyeliği yapmıştır. Çok sayıda hakemli makalesi, kitap bölümü ve konferans bildirisi bulunmaktadır.

**Prof. Dr. Lütfi AKCA | Turkish Water Institute |**
**lutfiakca[at]dsi.gov.tr | ORCID: 0000-0003-4098-9442**

Prof. Akca got his B.S. degree from İstanbul Technical University Civil Engineering Department in 1981 and got his M.Sc. and PhD degrees from Environmental Engineering Department of İstanbul Technical University in 1983 and 1986, respectively. He has 40 years of experience on water resources development, integrated water resources management and water and wastewater treatment. He served as Director General of Environmental Management between State Hydraulic Works. Currently, he is the President of Turkish Water Institute.. Moreover, he was a member of Turkish Presidency Local Administration Policies Council between 2018 and 2023. He has numerous peer-reviewed articles, book chapters and conference proceedings.

# KÜRESEL İKLİM PROJEKSİYONLARI VE TÜRKİYE'DE İKLİM DEĞİŞİMİ

# GLOBAL CLIMATE PROJECTIONS AND CLIMATE CHANGE IN TÜRKİYE

*Yurdanur ÜNAL*

DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch02

# KÜRESEL İKLİM PROJEKSİYONLARI VE TÜRKİYE'DE İKLİM DEĞİŞİMİ

***Yurdanur ÜNAL***
*İstanbul Teknik Üniversitesi*

**Özet**

Son yüzyıl içerisinde insan faaliyetleri sonucu artan sera etkisinin yarattığı iklim değişiminin etkileri yaşamımızda yoğun olarak hissedilmeye başlanmıştır. İklim değişikliğinin çevresel ve doğal sistemler üzerindeki potansiyel etkilerinin değerlendirilmesi iklim değişimine uyum ve iklim değişiminin etkilerinin azaltılması için çok önemlidir. Bu nedenle farklı senaryolar için iklimin nasıl değişeceği incelenmeli ve iklim değişimi ile baş etme stratejileri bu beklentiler ışığında ortaya konulmalıdır. Bu makalenin amacı iklimin küresel ölçekte değişimini ve özellikle Türkiye üzerindeki yansımalarını ortaya koymaktır. Bu bağlamda gelecek iklim projeksiyonlarının dayandığı iklim senaryoları ve iklim modelleri incelenecektir. Küresel modelleme çalışmalarının Ortak Sosyo-Ekonomik Rota senaryoları dahilinde küresel ortalama sıcaklıkların ve yağışların yersel ve zamansal değişimleri sunulacaktır. Bölgesel iklim modelleri kullanılarak orta ve yüksek emisyon senaryoları için üretilen Türkiye üzerindeki gelecek iklim projeksiyonları değerlendirilecektir.

***Anahtar Kelimeler***
*İklim projeksiyonları, SSP senaryoları, RCP senaryoları, Bölgesel iklim modelleri, Türkiye*

# GLOBAL CLIMATE PROJECTIONS AND CLIMATE CHANGE IN TÜRKİYE

***Yurdanur ÜNAL***
*İstanbul Technical University*

**Abstract**

The effects of climate change induced by increasing greenhouse effect due to the human activities have been intensely started to touch our daily lives. Evaluation of the potential effects of climate change on environmental and natural systems is very important for adaptation and mitigation of the effects of climate change. For this reason, how the climate will change within different emission scenarios should be examined and strategies to cope with climate change should be put forward in the light of these expectations. The aim of this article is to reveal the change of climate on a global scale and its reflections especially on Türkiye. In this context, climate scenarios and climate models on which future climate projections are based on, will be examined. Global climate model projections under different scenarios of Shared Socio-Economic Pathways will be presented by focusing on spatial and temporal variations of global average temperatures and precipitation. Future climate projections on Türkiye produced for medium and high emission scenarios using regional climate models will be discussed.

***Keywords***
*Climate Projections, SSP scenarios, RCP scenarios, Regional climate models, Türkiye*

## 1. Giriş

İklim, insan faaliyetleri kadar dünya üzerindeki yaşam üzerinde de önemli bir etkiye sahiptir. Sıcaklık ve yağış, belirli bir bölgede en iyi büyüyebilecek bitki türünü, yaz ve kış sıcaklıklarının yanı sıra sel olma olasılığına da bağlı olarak evlerin tasarımını ve konumunu belirler. Geç meydana gelen don olayları veya şiddetli bir dolu fırtınası tüm mahsulü mahvedebilir. İnsanlığın başlangıcından bu yana insanlar bu çeşit iklim ekstremleri ile baş etmek ve mümkünse ona uyum sağlamak zorunda kalmıştır.

Dünya tarihi boyunca iklim hiçbir zaman sabit kalmamış ve dünyanın küresel ortalama sıcaklığı 10°C aralığında değişmiştir. Bu 10°C sıcaklık aralığında dünya da buzul çağları meydana gelmiş olup bu buzul çağlar arasında da ılıman iklim koşulları gerçekleşmiştir. Bu nedenle son yüzyıl içerisinde endüstri devrimi öncesine göre küresel ortalama sıcaklıklarındaki 1,1°C'lik artış son derece hızlı bir iklim değişimine işaret etmektedir. Doğal ve insan kaynaklı radiatif zorlamaların dünya iklim sistemi bileşenleri olan atmosfer, okyanuslar, buz küre, yerküre ve biyosfer arasındaki çok farklı yersel ve zamansal ölçekte meydana gelen etkileşimleri değiştirmesi sonucunda iklim değişmiştir ve değişmeye devam etmektedir. İklimin doğal değişkenliği dünyanın yörüngesel parametrelerindeki değişimlere, volkan patlamalarına, güneş aktivitelerine bağlıdır. Son yüzyılda gerçekleşen bu artışlar, iklim bilimciler dışındaki insanlara küçük gelebilir fakat kıtaların orta kesimlerindeki (tarımın yoğunlaştığı yerler) değişiklikler tipik olarak küresel ortalama değişimin iki katı olurken yukarı enlemlerdeki değişimler küresel ortalamanın 3 ila 4 katıdır (tundra, donmuş toprak alanları, kuzey ormanları ve deniz buzu üzerinde büyük etkiler). Ayrıca, küresel ortalama yüzey sıcaklığındaki küçük değişimler insan aktivitelerini ve ekosistemi etkileyen iklim desenlerinde büyük değişimlere karşı gelmektedir (Schneider vd., 2014).

Popüler bir terim olan küresel ısınma yanlış bir tabirdir ve sıcaklığın üniform değişimini ifade eder. Gerçekte küresel iklim coğrafi, ekonomik ve sosyal boyutlarda eşit olmayacak şekilde değişmektedir. Günümüzdeki iklim değişimi tarihsel iklim değişimi ile karşılaştırıldığında hızlı olduğu kadar, ekosistemlerin ve insan toplumunun değişime uyum süreleri düşünüldüğünde de çok hızlıdır. Sıcaklığın yanı sıra yağış, atmosferdeki nem, toprak nemi, atmosferik dolaşım, fırtınalar, kar-buz örtüsü ve okyanus akıntıları dahil olmak üzere çok çeşitli kritik öneme sahip iklim olaylarını etkilemektedir. Ve etkileri insan refahı üzerinde şüphesiz her geçen gün daha fazla tehdit oluşturmaktadır.

Küresel iklim değişimi ve etkileri, dünyanın birçok yerinde gerçekleşen iklim olaylarını inceleyen binlerce bilimsel raporla belgelenmiştir. Doğal süreçler iklimi ve iklim değişimini hem kısa hem de uzun zaman ölçeklerinde etkilerken, insan ve insan faaliyetleri Sanayi Devrimi'nin başlangıcından bu yana istikrarlı bir şekilde artan bu olağanüstü hızlı iklim değişiminin baskın itici gücüdür ve son yıllarda ortaya konan bilimsel kanıtlar bu savı desteklemektedir. Nitekim Hükümetler Arası İklim Değişimi Panel (IPCC)'inin sunulan her raporu son yüzyıl içerisinde gözlenen iklim değişiminin insan etkisi ile olduğu hususundaki güveni arttırmaktadır (IPCC,2007; 2013; 2021).

İnsan etkileri ile atmosferin kompozisyonunun değiştirilmesi atmosferik sera etkisini arttırdığı için küresel iklimi değiştirmektedir. Atmosferdeki sera etkisi gazı olan $CO_2$'in konsantrasyonunun endüstri devrimi öncesi 1800'lerde 280 ppm değerinden 2022'de 415 ppm'ler civarına eksponansiyel olarak artması, aynı zamanda diğer sera gazlarının emisyonlarındaki artışlar ve buna bağlı olarak da dünya ikliminin ısınma trendi birçok atmosfer bilimcisini gelecekteki artışlara karşı küresel iklimin cevabını araştırmaya yöneltmiştir. Küresel iklim çalışmalarının derlendiği IPCC 5. ve 6. İnceleme Raporları, bağımsız veri setlerine dayanan analizlerle karalar üzerinde hava sıcaklığının okyanuslar üzerindekinden daha fazla arttığını, son kırk yılın geçmiş kayıtlara göre çok daha sıcak geçtiğini ve 2000'li yılların ise en sıcak yıllar olduğunu ortaya koymuştur. 1850-1900 periyoduna nazaran 2001-2020 yılları arasında küresel sıcaklıktaki artış 0,95°C ile 1,20°C arasında ve ortalama artış 1,01°C olmuştur. Nitekim yaşanan en sıcak 17 yılın 16'sı 2000'li yıllardan sonra gözlenmiştir ve en sıcak 5 yıl sırasıyla 2016, 2020, 2019, 2015 ve 2017 olarak kayıtlara geçmiştir. Bununla birlikte, her ne kadar IPCC (2013) raporu sıcaklık kayıtlarında şehir ısı adası etkisi düzeltmesi yapılmamasının sıcaklık artışında %10'un altında bir değişime işaret etse de hızla gelişen ve büyüyen şehirlerde şehir ısı adasının ve bazı bölgelerdeki arazi kullanımındaki değişikliklerin bölgesel eğilimler üzerinde etkilerinin artabileceğine de dikkat çekmiştir. Son raporun en önemli vurgusu iklim değişiminde insanın rolünün onaylanmış olmasıdır.

Bu makalenin amacı iklim değişiminin küresel ölçekte değişimini ve özellikle Türkiye üzerindeki yansımalarını ortaya koymaktır. Öncelikle gelecek iklim projeksiyonlarının dayandığı iklim senaryoları sunulacak, daha sonra küresel olarak iklim değişiminin farklı senaryolar dahilindeki beklentileri, Türkiye özelinde yapılan çalışmalara dayanan iklim değişimi etkileri sunulacaktır.

## 2. İklim Senaryoları

İklim değişikliğinin potansiyel etkilerini anlamak ve tahmin etmek için bilim adamları ve politika belirleyiciler tarafından geliştirilen birkaç farklı iklim emisyon senaryosu vardır. Bu senaryolar, fosil yakıtların yakılması gibi insan faaliyetlerinin atmosferdeki sera gazı konsantrasyonunu nasıl etkileyeceğine dair farklı varsayımlara dayanmaktadır.

IPCC, farklı seviyelerdeki sera gazı emisyonlarının iklim üzerindeki potansiyel etkilerinin anlaşılmasına yardımcı olmak için Temsili Konsantrasyon Rotaları (RCP'ler) olarak bilinen bir dizi senaryo geliştirmiştir. RCP'ler, gelecekteki emisyonlar için nispeten düşükten nispeten yüksek emisyon seviyelerine kadar değişen dört farklı rotaya dayanmaktadır. Her bir RCP, atmosferdeki $CO_2$ eşdeğerinin ($CO_2e$) milyonda parça (ppm) cinsinden ölçülen belirli bir sera gazı konsantrasyonu ile karakterize edilir (van Vuuren, vd., 2011).

RCP2.6: Sera gazı konsantrasyonlarının yüzyılın sonuna kadar 430 ppm $CO_2e$ civarında sabitlendiği bir düşük emisyon senaryosunu temsil eder. Bu senaryo, küresel ısınmayı sanayi öncesi seviyelerin 2°C ve altında sınırlamayı hedeflemektedir.

RCP4.5: Sera gazı konsantrasyonlarının yüzyılın sonuna kadar 540 ppm $CO_2$e civarında sabitlendiği bir orta emisyon senaryosunu temsil eder. Bu senaryo, küresel ısınmayı 2°C'nin altında sınırlama hedefiyle de tutarlıdır, ancak RCP2.6'dan daha önemli emisyon azaltımları gerektirir.

RCP6: Sera gazı konsantrasyonlarının yüzyılın sonuna kadar 630 ppm $CO_2$e civarında sabitlendiği orta ve yüksek emisyon senaryosu arasında kalan senaryoyu temsil eder. Küresel ısınmayı 2°C'nin altında sınırlama hedefiyle tutarlı değildir, ancak yine de en yüksek emisyon rotasından (RCP8.5) daha düşük ısınma seviyeleri ile sonuçlanacaktır.

RCP8.5: Sera gazı konsantrasyonlarının yüzyıl boyunca artmaya devam ederek 2100 yılına kadar yaklaşık 935 ppm $CO_2$e'ye ulaştığı yüksek emisyonlu bir senaryoyu temsil eder. Bu senaryo, küresel ısınmayı 2°C'nin altında sınırlama hedefiyle tutarlı değildir ve RCP'ler arasında en yüksek ısınma seviyelerine neden olacaktır.

IPCC ayrıca son raporuna baz olarak farklı toplumsal ve ekonomik kalkınma rotalarının sera gazı emisyonları ve iklim üzerindeki potansiyel etkilerini anlamak için Ortak Sosyo-Ekonomik Rotalar (SSP'ler) olarak bilinen bir dizi senaryo geliştirmiştir. SSP'ler, nüfus artışı, ekonomik gelişme, teknolojik değişim ve politika seçimleri dahil olmak üzere küresel kalkınmanın gelecekteki yönü hakkında farklı varsayımları temsil eden beş senaryoya dayanmaktadır. Her SSP, RCP'lerle bağlantılı düşükten yükseğe emisyon seviyelerine kadar değişen belirli bir dizi sera gazı emisyon senaryosuyla ilişkilidir. SSP senaryoları geleceğin tahmini yerine farklı kalkınma rotalarının iklim ve çevrenin diğer yönleri üzerindeki potansiyel etkilerini araştırmak için kullanılabilecek bir dizi olası gelecek sağlamayı amaçlamaktadır (Riahi vd., 2017). Aşağıda sunulan SSP etiketlerinde, ilk sayı varsayılan Ortak Sosyo-Ekonomik Rotayı, ikincisi ise 2100'deki yaklaşık küresel etkin olması beklenen radiatif zorlamayı ifade etmektedir. Bu senaryoların kabulleri kısaca aşağıdaki gibi özetlenebilir.

SSP1-1.9 ve 2.6: "Sürdürülebilir Kalkınma" olarak da bilinen bu rota, küresel kalkınmanın düşük nüfus artışı, hızlı teknolojik değişim ve sera gazı emisyonlarını azaltmaya ve iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlamaya yönelik güçlü çabaları karakterize eden bir geleceği temsil etmektedir.

SSP2-4.5: "Yolun Ortası" olarak da bilinen bu rota, küresel kalkınmanın ılımlı nüfus artışı, ılımlı teknolojik değişim ve sera gazı emisyonlarını azaltmak ve iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlamak için sınırlı çabaları karakterize eden bir geleceği temsil eder ve RCP4.5 emisyon senaryosu ile ilişkilidir.

SSP3-7.0: "Bölgesel Rekabet" olarak da bilinen bu rota, küresel kalkınmanın yüksek nüfus artışı, yavaş teknolojik değişim ve sera gazı emisyonlarını azaltmak ve iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlamaya yönelik sınırlı çabalarla karakterize edildiği bir geleceği temsil eder ve RCP6 emisyon senaryosu ile ilişkilidir.

SSP5-8.5: "Fosil Yakıtlı Kalkınma" olarak da bilinen bu rota, küresel kalkınmanın yüksek nüfus artışı, yavaş teknolojik değişim ve sera gazı emisyonlarını azaltmak ve iklim değişikliğinin etkilerine uyum sağlamaya yönelik sınırlı çabalarla karakterize edildiği bir geleceği temsil etmektedir. Bu rota aynı zamanda RCP8.5 emisyon senaryosuyla da ilişkilidir.

## 3. İklim Modelleri

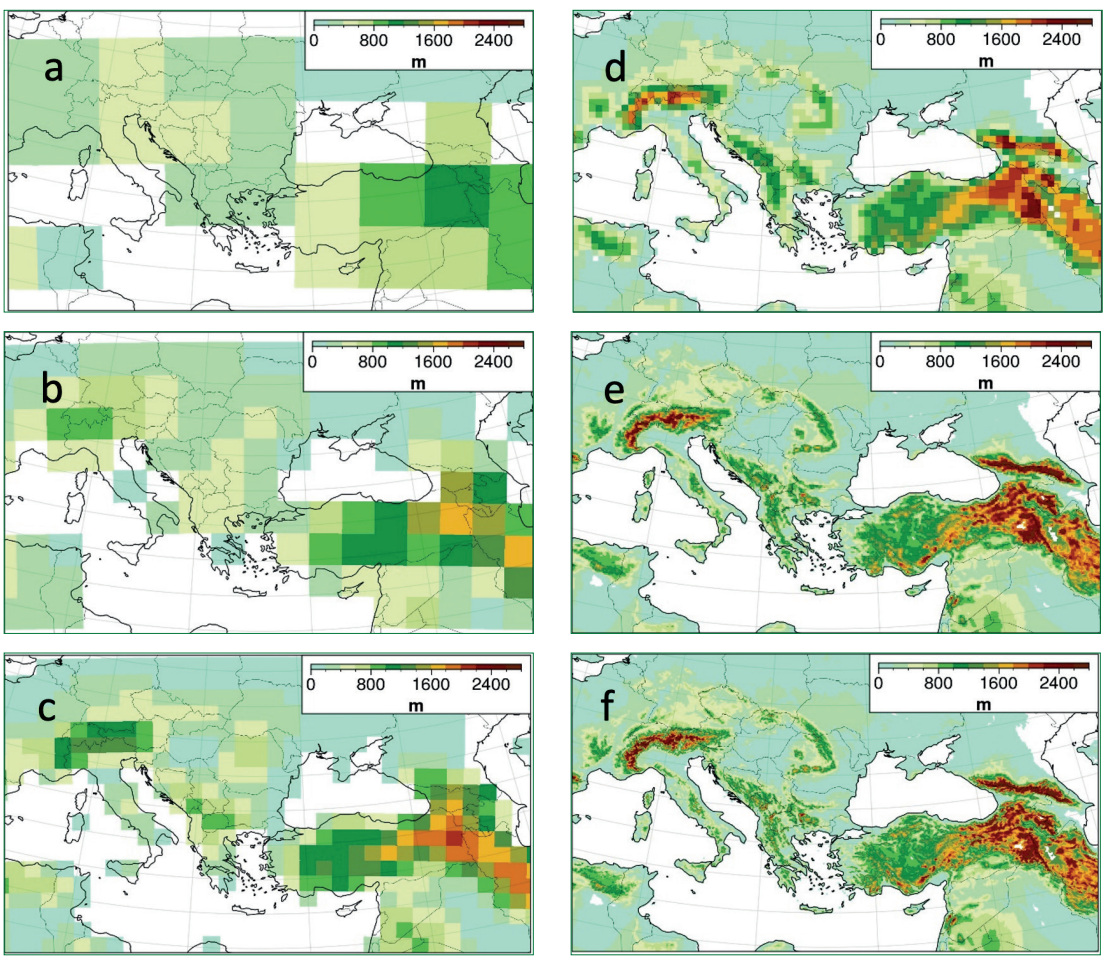
Doğal iklim zorlamaları, arazi kullanımındaki değişimler, antropojenik sera gazları ve aerosollerin emisyonundaki değişimlere bağlı iklim projeksiyonları benzeşimlerini elde etmek ve bu zorlamalara iklim sisteminin vereceği tepkiyi anlamak için birçok iklim modeli geliştirilmiştir. Küresel ve bölgesel modeller, iklim sisteminin en önemli özellikleri ve iklim değişiminin nedenleri hakkındaki bilgimizi geliştirmek için kullandığımız araçlardır.

İklim sisteminin karmaşık yapısından dolayı, iklim değişiminin veya iklim değişkenliğinin nicel bir tahminine yönelik analizler kapsamlı üç boyutlu sayısal yer sistem modellerinin (iklim modelleri) kullanımına dayanmaktadır. Genel anlamda bir iklim modeli, iklim sisteminin fiziksel, biyolojik ve kimyasal ilkelere dayanan matematiksel bir temsilidir ve türetilen denklemlerin lineer olmayışı nedeniyle sayısal olarak çözülmeleri gerekir. Sonuçta iklim modelleri ile boyutu modelin çözünürlüğüne bağlı olan bölgeler üzerindeki ortalama koşulların uzay ve zamanda ayrık çözümleri elde edilir.

En yüksek çözünürlüğe sahip iklim modelleri dahi atmosfer ve okyanus sınır tabakasındaki türbülans, sirkülasyonun küçük ölçekli topografya özellikleri, gök gürültülü fırtınalar, bulut mikro-fizik süreçleri vb. gibi küçük ölçekli süreçleri temsil etmekte yetersizdir. Bu nedenle açıkça hesaplanamayan fiziksel ve dinamik süreçlerin büyük ölçekli hareketler üzerindeki etkisi ampirik bağıntılar yardımıyla iklim modellerine dahil edilmektedir. Ayrıca iklim sistemi bileşenlerinin ayrıntılı davranışı hala yeterince anlaşılamadığından iklim modellerine eklenememektedir. Bu yaklaşımlar iklim modellerinin tahminlerindeki temel belirsizlik kaynağıdır. Bu nedenle farklı kurum ve özellikler ile geliştirilmiş iklim modellerinin topluluk simülasyonları ve toplulukta yer alan modellerin değişim aralığı iklim projeksiyonlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Model denklemlerinde yer alan fiziksel, biyolojik ve kimyasal bilgilerin yanı sıra iklim modelleri, gözlemlerden veya diğer modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen girdileri kullanır. İklim sisteminin neredeyse tüm bileşenlerini tanımlayan bir iklim modeli için güneş ışınımı, dünyanın yarıçapı ve dönme periyodu, kara topografyası ve okyanusun batimetrisi, kayaların ve toprağın bazı özellikleri vb. gibi nispeten sınırlı bir veri gerekli olsa da, atmosfer, okyanus ve deniz buzu fiziğini açıkça hesaplayan kısımlarında iklim sistemi bileşenlerinin tüm alt sistemleri için gereken bitki örtüsünün dağılımı, buz tabakalarının topografyası, vb. gibi sınır koşullarının sağlanması gereklidir. Veya buz tabakasının topografyası gibi bazı modellerde sabit tutulan bir sınır koşulu, iklim değişimini daha uzun bir zaman ölçeğinde inceleme amacı güdüldüğü zaman modelde etkileşimli olarak değişen bir parametre olarak ele alınmalıdır. İklim modellerinde gelecek emisyon senaryolarına göre $CO_2$ konsantrasyonundaki değişiklikler modele bir radiatif zorlama olarak verilirken, iklim sistemi bileşenleri arasındaki karbon döngüsünü hesaplayan

modellerde bu girdilere paralel olarak $CO_2$ konsantrasyonları hesaplanmaktadır. Küresel atmosfer-okyanus gözlemlerinin uydu teknolojileri ile genişletilmesi, iklim sistemi bileşenleri arasındaki etkileşimlerin daha iyi anlaşılması ve bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelerin daha yüksek çözünürlükte hesaplamaların yapılmasını mümkün kılması her geçen gün iklim simülasyonlarının tahmin güvenilirliğini arttırmaktadır. Şekil 1, IPCC'inin ilk raporundan son raporuna değin küresel ve bölgesel iklim modellerindeki çözünürlüğün değişimini göstermektedir. İklim modelleri 1990 yılları öncesinde 500km çözünürlükte, atmosfer ve okyanus modellerinin kuplesine dayanan iklim simülasyonları sergilerken, günümüzde küresel ve bölgesel modelleme yaklaşımları atmosfer, kara, okyanus, deniz buzu, aerosoller, karbon döngüsü, bitki örtüsü, sülfür ve azot gibi döngüleri de içerecek şekilde gelişmiştir. Özellikle son yıllarda küresel iklim modellerinin çıktılarını kullanarak bölgesel modelleme ile konveksiyona izin veren ölçeklerde iklim simülasyonları yapılmaya başlanmıştır. Şekil 1f bu ölçekteki modellerin çözünürlüğünün ne kadar hassas bir şekilde topoğrafyayı ifade edebildiğini göstermektedir.




***Şekil 1.*** *İklim modellerinin çözünürlüğü* ***a)*** *500 km,* ***b)*** *250 km,* ***c)*** *100 km,* ***d)*** *50 km,* ***e)*** *10 km ve* ***f)*** *3 km*

Küresel iklim projeksiyonları, mevcut en iyi bilimsel sonuçlara dayalı olarak, iklimin gelecekte nasıl değişmesi beklendiğine ilişkin tahminlerdir. Bu projeksiyonlar, iklimi etkileyebilecek atmosferdeki sera gazlarının konsantrasyonu, güneş'in enerjisindeki değişiklikler, volkanik patlamalar gibi doğal ve insan kaynaklı faktörlerin iklimi nasıl değiştireceğine bağlı olarak üretilir. Küresel iklim projeksiyonları, genellikle gelecekteki sera gazı emisyonları ve iklimi etkileyebilecek diğer faktörler hakkında farklı varsayımlara dayanan iklim senaryolarını dikkate almaktadır. Son yıllarda ikinci bölümde bahsi geçen senaryolar yaygın olarak kullanılmaktadır ve iklim değişiminin sıcaklık, yağış, deniz seviyesi ve aşırı hava olaylarının sıklığı ve yoğunluğu gibi çok çeşitli değişkenler üzerindeki potansiyel etkilerini anlamak için kullanılabilir. Bu tahminler, aynı zamanda iklim değişiminin etkilerini hafifletmek ve bunlara uyum sağlamak için stratejilerin geliştirilmesine bilgi sağlamaya yardımcı olabileceğinden, politika belirleyiciler ve karar vericiler için önemli bir araçtır. Bununla birlikte, iklim projeksiyonlarının bir dizi varsayıma dayandığı ve belirsizliğe tabi olduğu ve gelecekte meydana gelen gerçek iklim değişikliklerinin tahminlerden farklı olabileceğini unutmamak önemlidir.

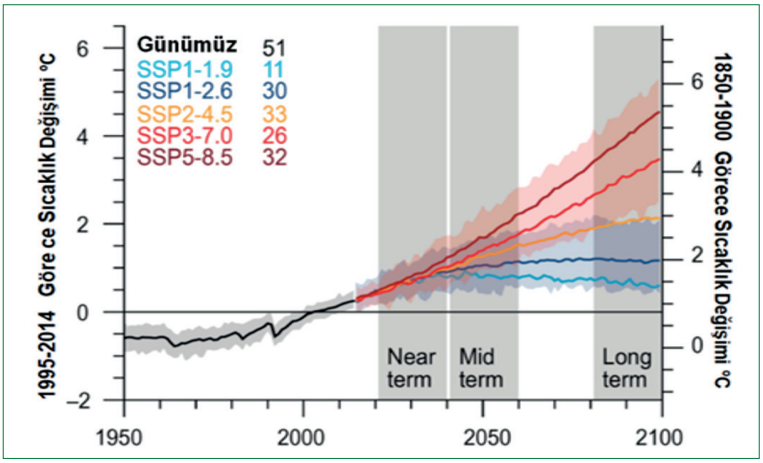
Küresel iklim projeksiyonları, atmosferdeki artan sera gazı konsantrasyonlarının bir sonucu olarak, dünyanın ortalama yüzey sıcaklığının önümüzdeki on yıllar ve yüzyıllar boyunca artmaya devam edeceğini göstermektedir.

Bu ısınmanın hızı ve büyüklüğü, sera gazı emisyonlarının seviyeleri, doğal yutakların (ormanlar ve okyanuslar gibi) karbondioksiti soğurmadaki verimliliği ve iklim sisteminin bu emisyonlara duyarlılığı gibi çeşitli faktörlere bağlı olacaktır.

## 4. Küresel İklim Projeksiyonları

Yeni senaryolar olan Ortak Sosyo-Ekonomik Rotaların kullanıldığı Birleşik Model Karşılaştırma Projesi 6'da (CMIP6) elde edilen projeksiyonlar, sıcaklıkların tüm emisyon senaryolarında yüzyılın ortalarına değin artmaya devam edeceğini göstermektedir (Şekil 2). Ancak $CO_2$ ve diğer sera gazları emisyonlarında ciddi bir azaltma yapılmazsa küresel ortalama sıcaklıkların 21. yüzyıl içinde 2ºC değerini aşmaması pek olası görünmemektedir. En düşük emisyon senaryosu SSP1 dahi yüzyılın sonunda (2081-2100) sıcaklıklardaki artışın 1,0-1,8 ºC aralığında olacağını, orta SSP2 ve yüksek SSP5 emisyon senaryoları ise sırasıyla 2,1-3,5ºC ve 3,3-5,7 ºC aralıklarında olacağını öngörmektedir. Dolayısıyla, 2ºC sıcaklık artışının hem orta hem de yüksek emisyon senaryolarında aşılması son derece muhtemel gözükmektedir. Ortalama sıcaklıklardaki artış ve azalışların on yıllık zaman dilimlerinde artma ve azalma eğilimi göstermesi muhtemeldir.

Küresel ortalama sıcaklıklarda 1850–1900 dönemi ortalamasına göre SSP2-4.5, SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 senaryolarında 1,5°C'lik eşiğin ortalama 2030 civarında aşılması, 2°C'lik eşiğin aşılmasının SSP5-8.5 senaryosunda ortalama 2043 civarında ve 3°C'lik eşiğin aşılmasının SSP5-8.5 senaryosunda yaklaşık 2062 yılında meydana gelmesi çok muhtemeldir. SSP1-1.9 ve SSP1-2.6 senaryolarında ise 2°C'lik eşiğin aşılmama olasılığı mevcuttur. 4°C'lik eşiğin aşılması SSP5-8.5 senaryosunda yüzyılın sonunda gerçekleşecektir. Dünyanın en son 3 ila 4 ºC daha sıcak olduğu zaman, 30 milyon yıl önce, iklimin büyük ölçüde farklı olduğu ve deniz seviyesinin 20 ila 30 metre daha yüksek olduğu zamandı (Schneider vd., 2014).




***Şekil 2.*** *CMIP6 günümüz ve gelecek senaryoları için iklim simülasyonlarında* ***a)*** *sıcaklık ve* ***b)*** *yağış değişimi (IPCC AR6, 2021)*

CMIP6 modelleri, yıllık ortalama yüzey hava sıcaklığının karada okyanusa göre yaklaşık %50 daha fazla ve Kuzey Kutbu'nun küresel ortalamanın yaklaşık 2,5 katından daha fazla ısınacağını öngörmektedir. 2081–2100 periyodunda, 1995–2014'e göre sırasıyla SSP1-1.9 ve SSP5-8.5 senaryoları kara sıcaklıklarında 0,3°C–2,0°C ve 3,5°C–7,6°C ısınma aralığı göstermektedir. Arktik yüzey hava sıcaklığının değişim aralığı ise 0,5°C–6,6°C ve 6,2°C–15,2°C arasında beklenmektedir (IPCC, 2021).

1850–1900 dönemine göre küresel ortalama sıcaklıkların 1,5°C, 2°C, 3°C ve 4°C olduğu durumda bölgesel olarak sıcaklık, yağış ve atmosferik sirkülasyon özelliklerinin değiştiği görülmektedir. Dünya üzerinde farklı bölgelerin ortalama ısınmaya tepkileri farklılıklar göstermektedir.

Örneğin ortalama 1,5°C sıcaklık artışında okyanus alanlarında sıcaklık artışları 0-1,5°C aralığında kalırken, özellikle kuzey kutup bölgelerinde sıcaklık artışı 4-5°C arasında olmaktadır. Yıllık ortalama sıcaklıktaki en büyük artış, tüm küresel ısınma seviyelerinde kuzey yarıkürenin yukarı enlemlerinde bulunmaktadır (IPCC, 2021).

Kutup bölgelerindeki buzul alanların azalması yüzey albedosunu azaltarak daha fazla güneş radyasyonunun soğurulmasını sağlamakta, aynı zamanda kutupsal dar alandaki kuvvetli ısınma atmosfer ve okyanuslarca kutba doğru olan ısı transferini arttırarak sıcaklıklardaki artışların ortalamadan çok daha yüksek olmasına neden olmaktadır. CMIP6 topluluk ortalamaları 1,5°C, 2°C, 3°C ve 4°C küresel ısınma için Arktik yıllık ortalama sıcaklıklarının sırasıyla 2,3, 2,5, 2,4 ve 2,4 küresel ortalamanın katları kadar ısındığını göstermektedir. Yani, kuzey kutbu ısınması global ortalama ısınmayla doğrusal olarak değişmektedir. Güney yarımkürede Antarktika kıtasının, küresel ısınmanın tüm seviyelerinde aynı yarıkürede orta enlemlerdeki okyanus alanlarından daha yüksek oranda ısınması beklenmektedir. 21. yüzyılda güney yarımküre

yüksek enlemlerindeki ısınmanın küresel ortalama sıcaklıktaki değişimi aşacağı veya 1,5°C ile 4°C arasında değişen sıcaklık değişimleri için tropiklerdeki ısınmadan önemli ölçüde daha fazla olacağı beklenmektedir. Özetle, küresel ortalama sıcaklığın artması beklenirken, sıcaklık değişiminin büyüklüğü ve deseni farklı bölgeler ve mevsimler arasında değişiklik gösterecek ve bazı bölgelerde küresel ortalamadan daha fazla veya daha az ısınma yaşanacaktır.

Küresel ortalama yağış, global ortalama sıcaklıklar yükseldikçe, her 1°C'de %1–3 kadar artarken, yağış değişim desenleri sıcaklık artışı ile doğrusal olarak değişmemektedir. Bununla birlikte, CMIP6 altındaki modellerin büyük bir kısmı senaryolar bazında farklılıklar göstermesine karşın beklenen yağış değişimi konusunda hemfikirdir. Yağış, yüksek enlemlerde ve tropik bölgelerde büyük olasılıkla, muson bölgesinin büyük bir kısmında muhtemelen artacaktır. Ancak tüm senaryolarda Akdeniz, Güney Afrika, Avustralya ve Güney Amerika'nın subtropikal enlemlerinde yağış azalacaktır. Yağıştaki artış ve azalma miktarları, küresel ısınmanın daha yüksek seviyelerinde şiddetlenecektir. Genel olarak, küresel ortalama sıcaklıklar 2,5°C–3°C veya daha fazla arttığında, bölgesel yıllık ortalama yağışta istatistiksel olarak anlamlı değişikliklerin olması beklenmektedir (Tebaldi vd., 2015). Ortalama ısınmanın karada daha yüksek olacağı neredeyse tüm modellerin genel sonucudur. Isınma arttıkça, hem dünya genelinde hem de kara alanları üzerinde yağışların istatistiksel olarak anlamlı artış veya düşüşlerinin yaşanacağı bölgeler genişleyecektir (Pendergrass vd., 2017).

Global ortalama sıcaklığın endüstri devrimi öncesine göre 1,5°C'nin üzerine çıktığı simülasyonlarda 1850–1900 arasındaki döneme göre eşik sıcaklığı aştığında karalar üzerindeki yağıştaki ortalama değişim %1,6 civarındadır. 2,0°C (SSP3-7.0 veya SSP5-8.5) ve 3,0°C'nin (SSP5-8.5) üzerinde ortak küresel ısınmaya sahip senaryolar için ise küresel sıcaklıklar 2,0°C ve 3,0'ı aştığında karalar üzerindeki yağıştaki ortalama artış sırasıyla yaklaşık %2,6 ve %4,9'dur. SSP1-1.9 ve SSP1-2.6 altında ortalama olarak, küresel ısınmanın 1,5°C ve 2,0°C'yi aştığı simülasyonlar için küresel kara yağış değişimi sırasıyla yaklaşık %1,9 ve %3,0 olacaktır.

IPPC'ye göre, küresel iklim projeksiyonları, yağış miktarının yüksek enlemlerde (kutuplara yakın) ve bazı tropikal bölgelerde artacağını ve bazı subtropikal ve orta enlem bölgelerinde azalacağını göstermektedir. Genel olarak, bu tahminler, aşırı yağış olaylarının (aşırı yağış veya kar yağışı gibi) yoğunluğunun ve sıklığının birçok bölgede artacağına işaret etmektedir.

İklim değişikliğine bağlı bölgesel aşırı yağış değişikliklerinin dünyanın farklı yerlerinde değişiklik göstermesi beklenmektedir. İklim değişikliğinin aşırı yağış üzerindeki etkilerine ilişkin mevcut bilimsel yayınlar aşırı yağış olaylarının yoğunluğunun ve sıklığının artma olasılığının yüksek olduğuna işaret etmektedir. Avrupa'nın birçok yerinde aşırı yağış olaylarının sıklığında ve yoğunluğunda bir artış yaşanması ve en büyük artışların kıtanın kuzey ve batı kısımlarında meydana gelmesi beklenmektedir. Bu değişikliklere muhtemelen sel ve heyelanların sıklığı ve şiddetinde bir artış eşlik edecektir. Kuzey Amerika'nın birçok bölgesinde, en büyük artışların Kuzeydoğu ve Orta Batı'da meydana gelmesiyle birlikte, aşırı yağış olaylarının sıklığında ve yoğunluğunda bir artış yaşanması olasıdır. Asya'nın bazı bölgelerinde, özellikle muson

bölgesinde yer alan bölgelerde, en büyük artışların yaz aylarında meydana gelmesiyle birlikte, aşırı yağış olaylarının sıklığı ve yoğunluğu artacaktır. Orta Doğu'da aşırı yağış olaylarının sıklığında ve yoğunluğunda bir artış yaşama olasılığı mevcut olsa da bölge daha sıcak ve daha kuru hale geldikçe, özellikle yaz aylarında kuraklığın yoğunluğunda ve sıklığında bir artış beklenmektedir.

Küresel ortalama deniz seviyesinin küresel yüzey sıcaklığındaki değişikliklerle tutarlı olarak okyanus termal genleşmesi ve buzulların erimesi sonucu yükselmesi beklenmektedir. Günümüzde son on yıl içerisindeki deniz seviyesi artışı geçmişteki on yıllardan daha fazladır ve 1960'lı yıllardan bu yana 3.7 mm/yıl civarındadır.

Deniz seviyesi sera gazı emisyonlarına küresel yüzey sıcaklığından daha yavaş yanıt vermektedir. Bununla birlikte, emisyonların kesilmesinden sonra dahi okyanuslarda ısı depolanması, derin okyanus sirkülasyonundaki değişimler yüzyıllar veya bin yıllar zaman ölçeğinde deniz seviyesinde değişime neden olabilmektedir. Örneğin en düşük emisyon senaryosunda okyanusların ısı kapasitesinin artışının 2300 yılına kadar devam edebileceği öngörülmektedir. 2100 yılına gelindiğinde, 1995–2014 ortalamasına göre deniz seviyesinin SSP1-1.9 senaryosunda 0,28–0,55 m ve SSP5-8.5 senaryosunda 0,63–1,01 m artacağı tahmin edilmektedir.

## 5. Türkiye Projeksiyonları

Çalışmalar ülkemizin de içinde yer aldığı Akdeniz havzasının atmosferdeki sera gazı konsantrasyonlarındaki değişimlerin sonucu küresel ısınmanın etkilerinin görüldüğü iklim değişikliği sıcak noktalarından biri olduğunu göstermektedir (Diffenbaugh & Giorgi, 2012). CMIP5, CMIP6, HighResMIP ve CORDEX simülasyonlarının tümü Akdeniz havzasında sıcaklıkların yüzyılın sonunda RCP8.5 senaryosu için 3,5°C ile 8,75°C arasında artacağını öngörmektedir. Modellerden ve emisyon senaryolarından büyük ölçüde bağımsız olarak, yaz aylarındaki ısınmanın, küresel yıllık ısınmadan %40-50'ye kadar daha yüksek olacağı tahmin edilmektedir. Türkiye, Balkanlar, İber Yarımadası ve Kuzey Afrika bölgeleri üzerinde öngörülen ısınma yersel olarak küresel ortalamanın iki katına ulaşabilmektedir ve yaz sıcaklıklarında artış yıllık sıcaklık salınımın genliğini arttırmaktadır (Lionello & Scarascia, 2018; Almazroui vd., 2020). İklim modelleri, tüm mevsimlerde yağışta bir azalma ve Akdeniz ikliminin kuzeye ve doğuya doğru genişleyeceğini ve etkilenen bölgelerin artan kuraklık ile daha kurak hale geleceğini öngörmektedir (Alessandri vd., 2015; Rajczak & Schär, 2017; Lionello & Scarascia, 2018; Spinoni vd., 2020). Yağışlardaki azalmanın bir sonucu olarak toprak neminin azalması ve dolayısıyla buharlaşma ile yüzeyin soğuyamaması bölgede sıcaklıkların daha hızlı artışını sağlayacaktır.

Global iklim projeksiyonlarının Türkiye coğrafyası gibi son derece değişken topoğrafya, kıyısal zonlar ve bitki örtüsüne sahip bir bölgede daha yüksek çözünürlükte tespiti, adaptasyon çalışmaları ve alınacak önlemler için stratejilerin belirlenmesinde önem arz etmektedir. Zira iklim değişimi tarım, su kaynakları, sağlık ve turizm alanları gibi sektörlerde anlamlı etkiler

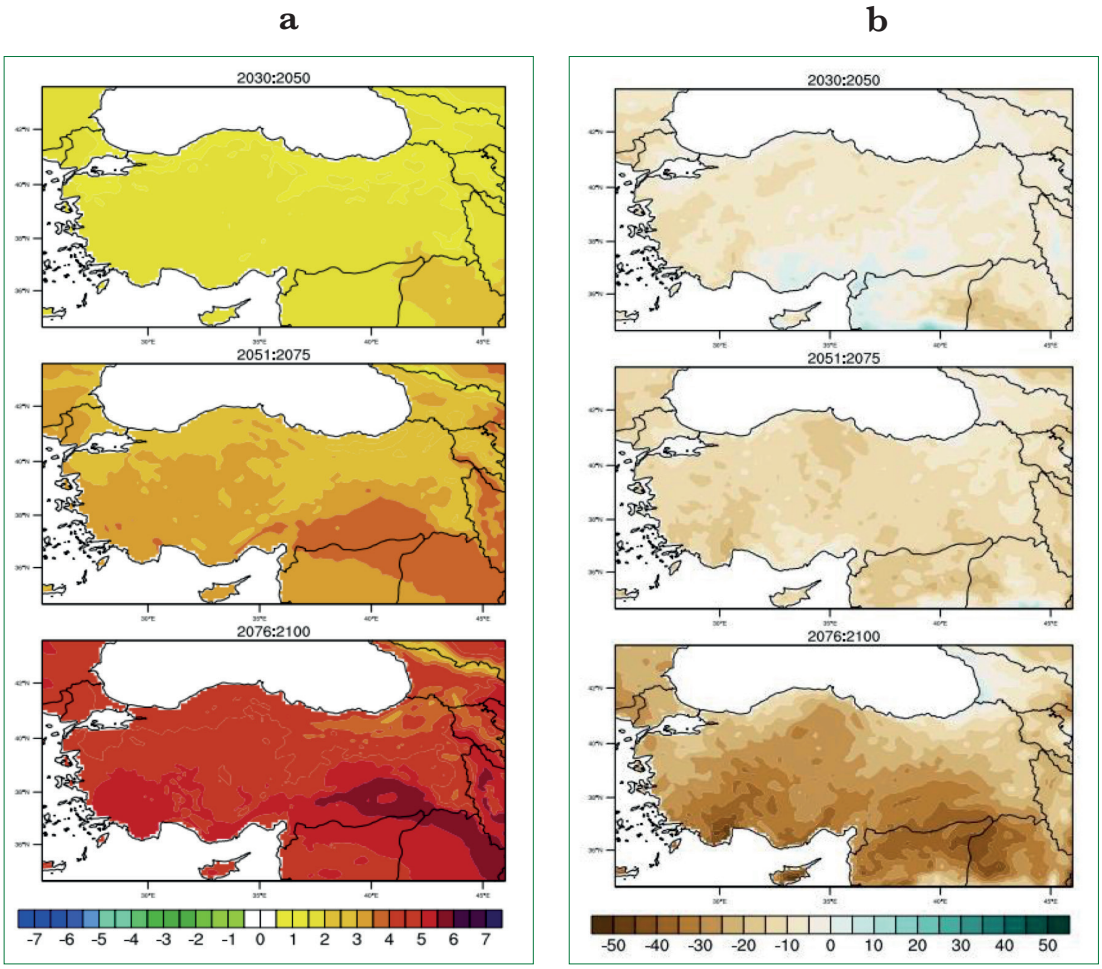
yaratabilir. Daha iyi çözünürlükte bilgi sağlamak için küresel iklim model çıktıları, bölgesel iklim modelleri ile dinamik ölçek küçültme yöntemi kullanılarak sınırlı alanlara transfer edilmektedir. Türkiye iklimindeki değişkenliğini araştırmak için birçok modelleme çalışması yapılmıştır. Ünal vd., (2001); Önol ve Semazzi (2009); Ünal vd., (2010); Bozkurt ve Şen (2011); Önol (2012); Önol ve Ünal (2014), Önol vd., (2014), MGM (2015) ve SYGM (2016) Türkiye'yi içeren iklim modelleme çalışmalarının örnekleridir. Fakat yerel ölçekte etki çalışmalarının yapılabilmesi için son yıllarda Türkiye üzerinde 3 km çözünürlükte bölgesel iklim simülasyonları gerçekleştirilmeye başlanmıştır (Yürük, 2017; Ünal & Yürük, 2017; Yürük & Ünal, 2016; Yürük vd., 2022). Bölgesel iklim modeli simülasyonlarında büyük bir belirsizlik kaynağı alt grid ölçekli konveksiyonun parametrelendirilmesinden kaynaklanmaktadır. Artan model çözünürlüğü ile konveksiyona izin veren ölçeklere yaklaşıldığından konveksiyon parametrizasyonunu kapatmak mümkündür. Çok yüksek çözünürlüklerdeki simülasyonlar özellikle aşırı hava olayları (örneğin aşırı yağış) ile bağlantılı istatistikleri daha iyi temsil etme yeteneğine sahiptir.

SGYM (2016) çalışması, CMIP5 veri tabanından seçilen MPI-ESM-MR ve CNRM-CM5.1, HadGEM2-ES yer sistem modellerinin tanımladığı başlangıç ve sınır koşulları ile zorlanan RegCM bölgesel modeliyle Türkiye üzerinde 10 km çözünürlükte RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için gelecek iklim projeksiyonları gerçekleştirmiştir. Bu modellerin projeksiyonları, orta emisyon senaryosu RCP4.5 için 21. yüzyılın son on yılında ortalama sıcaklıkların 1970-2000 referans sıcaklıklarına kıyasla sırasıyla 2,0°C, 2,5°C, 3.4°C, RCP8.5 senaryosunda ise 4,5°C, 4,3°C ve 5,9°C artacağını öngörmektedir. RCP4.5 senaryosunda sıcaklık artışlarında kış ve yaz mevsimleri arasındaki farklar en fazla 1,3°C'ye ulaşırken, RCP8.5 senaryosunda yaz ve kış mevsimi sıcaklık eğilimleri önemli farklılıklar göstermekte ve 2,7°C'ye ulaşmaktadır. Yağışlarda ise Türkiye ortalamasında her iki senaryoda da azalma mevcuttur. RCP8.5 orta senaryoya göre yüzyılın sonuna doğru Türkiye'nin daha güçlü bir kuraklığa maruz kalacağına işaret etmektedir. Bununla birlikte mevsimsel ve yıllık yağış değişimlerinin yersel dağılımı tüm modellerde benzerlik göstermektedir.

Şekil 3.a MPI-ESM-LR yer sistem modeli ile zorlanan yaklaşık0,11 derece (12 km) çözünürlüklü COSMO-CLM bölgesel modelinin RCP8.5 için sıcaklık simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Genel olarak sıcaklıktaki artışlar 2030'lu yılardan sonra yaklaşık 1,5-2°C, 2050'den sonra kuzeyde 3°C iken güneydoğuda 3,5-4,0°C ve 2070 yılından sonra ortalama 4°C civarında fakat Türkiye'nin güneydoğu bölgesinde 5,5-6,0°C olmaktadır.

Şekil 3.b yağışların referans dönemine göre yüzde olarak değişimlerini göstermektedir. Ülkemiz en fazla yağışını kış ve bahar mevsimlerinde almaktadır. Türkiye'nin güney enlemlerinde kış ve ilkbahar mevsimlerindeki yağış eksikliklerinin yüzyılın sonuna doğru şiddetlenmesi, bu bölgelerdeki su kaynaklarımızı ve tarımsal faaliyetleri önemli ölçüde etkileyecektir. Gelecekte Türkiye'nin kuzeyinde yer alan bölgelerde iklim rejiminin referans dönemine benzer veya biraz daha fazla yağışlı olacağı öngörülmektedir. Bununla birlikte 2076-2100 periyodunda Akdeniz, Güney Ege, Güney Doğu ve Doğu Anadolu bölgelerinde yağış eksikliği çok şiddetlenerek,

referans dönemi yağışlarına nispeten %30-35 civarında azalacaktır. Havzalar bazında yağış değişimleri incelendiğinde en fazla değişimlerin azalma yönünde Doğu Akdeniz, Batı Akdeniz ve Ceyhan havzalarında olduğu görülmektedir. Özellikle yükseltinin fazla olduğu bölgeler kar yağışlarının sıklıkla görüldüğü bölgelerdir ve kar örtüsü erimeksizin bahar aylarına kadar kalmaktadır. Fakat artan sıcaklıklar kışın yağışın karakterini kardan yağmura değiştirerek, yüzeyde doğal su depolama rezervuarlarının kapasitesini azaltmakta ve kar örtüsünün erken erimesiyle yüzeyin güneş ışınımı yansıtma kabiliyeti azalmaktadır. Bu durum daha fazla gelen güneş ışınımının soğurulması ile bu bölgelerde ivmelenen sıcaklıklara neden olmaktadır.

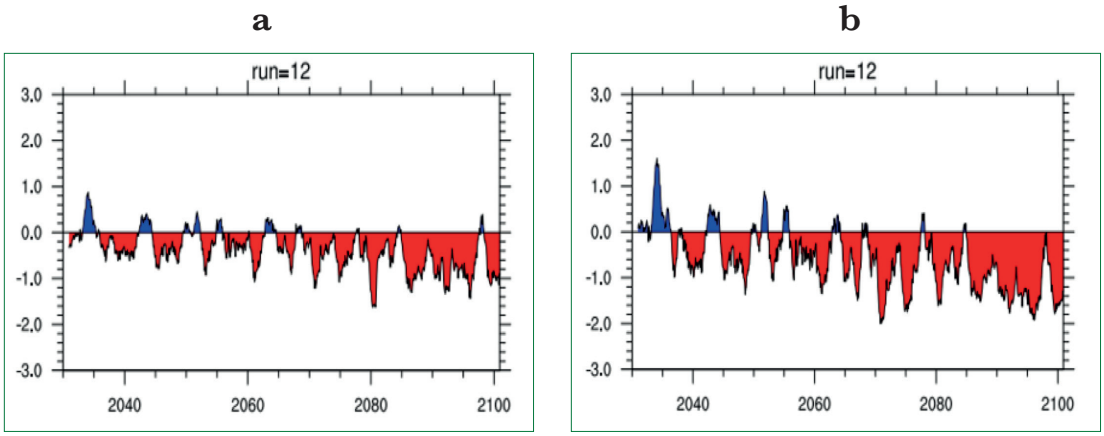



***Şekil 3.*** *RCP8.5 senaryosu için gelecek dönemlerde 2030-2050, 2051-2075, 2076-2100 ortalama referans 1989-2005 periyoduna göre* ***a)*** *sıcaklıkların değişimi,* ***b)*** *yağışların %olarak değişimi.*

Bu nedenle daha uzun süre karla kaplı bölgelerde özellikle yüzyılın ikinci yarısına doğru artan sera gazı zorlamaları daha hızlı sıcaklık artışlarının oluşmasına neden olmaktadır. Ayrıca yağış miktarlarında değişim olmazsa dahi artan sıcaklıklar nedeniyle kış mevsiminde yüzey akışının artacağı ve ilkbahar aylarında azalabileceği beklenmelidir.

Zira artan sıcaklıklar kışın daha az kar yağması ve birikmesine, mevcut karın da ilkbahar aylarında daha erken erimesine neden olarak yüzey akışlarını değiştirecektir. Ek olarak daha yüksek sıcaklıklarda buharlaşmanın artışı bahar ve yaz aylarında su stresi yaratacaktır.

Türkiye üzerinde 12 aylık Standart Yağış Indeksi (SPI) ve Standart Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI) ortalamalarının değişimleri 2030-2100 yılları arası için hesaplanmıştır (Şekil 4). Referans periyodu için hesaplamalarda SPI ve SPEI arasında fark oldukça küçükken, 2030-2100 yılları arasında fark giderek açılmaktadır. SPI sadece yağışa bağlı olarak kuraklığı ifade etmektedir. Türkiye genelinde yağışların yüzyılın sonuna doğru azalması kuraklığı şiddetlendirecek ve kurak periyotların süresini uzatacaktır. Bununla birlikte genel olarak daha yüksek sıcaklıklar evapotranspirasyonu arttırarak toprağı nem bakımından yoksun hale getirecek, kuraklığın şiddetlenmesine ve daha uzun yıllar hakim olmasına neden olacaktır.




***Şekil 4.*** *RCP8.5 senaryosu için 12 aylık kuraklık indisleri değişimi* ***a)*** *SPI ve* ***b)*** *SPEI*

## 6. Sonuçlar

Son yüzyıl içinde küresel iklim değişiminin insan etkileri ile atmosferin kompozisyonunun değiştirilmesinin bir sonucu olduğu bilim insanlarınca yaygın olarak kabul edilmektedir (IPCC, 2007; IPCC, 2013; IPCC, 2021). Atmosferdeki sera gazlarındaki eksponansiyel artışlar ve bu artışın son bir kaç on yıl içerisinde ivme kazanması iklim sistemi bileşenlerinin bu değişimlere nasıl tepki vereceğinin saptanmasına yönelik çalışmaları ön plana çıkarmıştır.

Yeni SSP senaryoları için elde edilen projeksiyonlar, sıcaklıkların tüm emisyon senaryolarında yüzyılın ortalarına değin artmaya devam edeceğini göstermektedir. Sera gazları emisyonlarında ciddi bir azaltma yapılmaz, jeomühendislik yaklaşımları ile atmosferden karbon uzaklaştırılamazsa küresel ortalama sıcaklıkların 21. yüzyıl içinde 2°C değerini aşması kuvvetle

muhtemeldir. En düşük emisyon senaryosu dahi yüzyılın son yirmi yılındaki sıcaklıklardaki artışın 1,0-1,8 ºC aralığında olacağını, yüksek emisyon senaryoları ise sırasıyla 3.3-5.7 ºC aralıklarında olacağını öngörmektedir. Dolayısıyla, 2ºC sıcaklık artışının hem orta hem de yüksek emisyon senaryolarında aşılması son derece muhtemel gözükmektedir. Ayrıca kutup bölgelerinin tropiklere göre daha yüksek hızda ısınması, ekvator ve kutuplar arasındaki sıcaklık zıtlığını azaltarak hem atmosfer hem de okyanus dolaşımını değiştirmektedir. Buna bağlı olarak yağış desenlerinin ve yağış miktarının (yağmur, kar ve diğer yağış biçimleri dahil) iklim ısındıkça bölgesel ve mevsimsel farklılıklar göstermesi beklenmektedir ve yağışta hem artışlara hem de azalmalara işaret etmektedir. Bazı bölgelerde küresel ortalamadan daha fazla veya daha az yağış görülecektir. Özetle, CMIP6 modellerinin değerlendirmesine göre küresel ortalama yüzey sıcaklığındaki artışla birlikte hızlanan hidrolojik döngü nedeniyle küresel ortalama yağışın artacağına dair yüksek bir güven vardır. Yağış, yüksek enlemlerde ve tropik bölgelerde büyük olasılıkla artacak, muhtemelen muson bölgesinin büyük bölümlerinde artacak, ancak subtropikal bölgelerde muhtemelen azalacaktır. Küresel ısınmanın daha yüksek seviyelerinde yağıştaki artış ve düşüşlerin büyüyeceği yüksek bir güvenilirlikle tahmin edilmektedir.

Türkiye iklim değişimine en hassas olarak tanımlanan Akdeniz havzasında yer almaktadır. Bölgesel modelleme çalışmaları ortalama sıcaklıkların RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre yüzyıl sonuna kadar artacağını ve yüzyılın sonunda sıcaklık artışlarının senaryolara bağlı olarak 2℃ ile 6℃ aralığında olacağını tespit etmiştir. Simülasyonlar yaz aylarında sıcaklıkların kış aylarından çok daha fazla ısındığını, Güney Ege kıyıları, Akdeniz, Güney Doğu Anadolu Bölgelerindeki sıcaklık artışlarının daha kuvvetli olduğunu göstermektedir. Gündüz ve gece sıcaklıklarının artışı Türkiye'de sıcak hava dalgalarının hem sıklığını hem de süresini arttıracaktır. Atmosferik nemin artışı da göz önüne alındığında hissedilir sıcaklıklar daha yükselecektir. Buna bağlı olarak yaz aylarında soğutma amaçlı enerji kullanımında artışlar beklenmelidir.

Türkiye yıllık toplam yağışlarında hem iyimser hem de kötümser senaryo azalma öngörmektedir. RCP8.5 orta senaryoya göre yüzyılın sonuna doğru Türkiye'nin daha güçlü bir kuraklığa maruz kalacağına işaret etmektedir. Doğu Anadolu bölgesindeki karın azalması günümüzde erimenin gerçekleştiği bahar ve yaz aylarında akarsuların debilerinde ciddi düşmelere sebep olabilir. Bu da Türkiye'nin tarım sektörü ve enerji sektöründe ekonomik kayıplara neden olacaktır. Özellikle sıcaklıkların artışına bağlı olarak artan evapotranspirasyon tarım sektöründe sulama ihtiyacını arttıracaktır.

## 7. Kaynaklar / References


Alessandri, A., De Felice, M., Zeng, N., Mariotti A., Pan Y., Cherchi A., Lee J. Y., Wang B., Ha K. J., Ruri P., Artale V. (2015), Robust assessment of the expansion and retreat of Mediterranean climate in the 21stcentury. *Scientific Reports*, 4(1), 7211.

Almazroui, M., Saeed, F., Saeed, S., Islam M. N., Ismail M., Klutse N., Siddiqui M. H. (2020), Projected Change in Temperature and Precipitation Over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4(3), 455–475

Alessandri, A., De Felice, M., Zeng, N.Robust assessment of the expansion and retreat of Mediterranean climate in the 21$^{st}$ century. *Sci Rep* **4**, 7211 (2014). https://doi.org/10.1038/srep07211

Bozkurt, D., & Şen, O. (2011). Precipitation in the Anatolian Peninsula: sensitivity to increased SSTs in the surrounding seas. *Climate Dynamics,* 36(3-4), 711-726.f

Diffenbaugh & Giorgi, (2012), Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble, *Climatic Change,* 114(3-4), 813-822.

IPCC. (2001). Climate change 2001: impacts adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., D. J. Dokken, & K. S. White (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC. (2007). Climate Change 2007: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In S. Solomon, D. Qin, M. Manning, M. Marquis, K. Averyt, M. M. B. Tignor, H. L. Miller Jr., & Z. Chen (Eds.). Cambridge: Cambridge University Press.

IPCC. (2013). Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Panel. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, SL Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, MI Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, JBR Matthews, TK Maycock, T.Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.). Cambridge University Press

IPCC SREX. (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation.

Lionello ve Scarascia, (2018) The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Reg Environ Change,* 18, 1481–1493.

MGM, (2014) Yeni Senaryolarla Türkiye için İklim Değişikliği Projeksiyonları, Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.

Pendergrass, A.G., R. Knutti, F. Lehner, C. Deser, and B.M. Sanderson, 2017: Precipitation variability increases in a warmer climate. *Scientific Reports*, 7(1), 17966.

Rajczak, J. & C. Schär, (2017) Projections of Future Precipitation Extremes Over Europe: A Multimodel Assessment of Climate Simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(20), 10773–10800.

Riahi, K., van Vuuren D. P., Kriegler E., Edmonds J., O'Neill B. C., Fujimori S., Bauer N., Calvin K., Dellink R., Fricko O., Lutz W., Popp A., Cuaresma J. C., KC S., Leimbach M., Jiang L., Kram T., Rao S., Emmerling J., …, Tavoni M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change,* 42, 153-168

Schneider S.H., (2014) Climate Change Science and Policy, Island Press, 2014. ProQuest Ebook Central.

Spinoni, J., Barbosa, P., Bucchignani, E., Cassano, J., Cavazos, T., Christensen, O. B., Christensen, J. H., Coppola E., Evans J., Geyer B., Giorgi F., Hadjinicolaou P., Jacob D., Katzfrey J., Koenigk T., Laprise R., Lennard C. J., Kurnak L., Li D., …, Dosio A. (2020) Future Global Meteorological Drought Hot Spots:A Study Based on CORDEX Data. *Journal of Climate*, 33(9), 3635–3661.

Önol, B. (2012). Effects of Coastal Topography on Climate: High-Resolution Simulation with a Regional Climate Model. Climate Research.

Önol, B., Semazzi, F. (2009). Regionalization Of Climate Change Simulations over the Eastern Mediterranean. J.Climate, 1944-1961.

Önol, B.; Semazzi, F.H.M.; Unal, Y.; Dalfes, H.N.(2006) Regional Climatic Impacts of Global Warming over the Eastern Mediterranean. Climate Change and the Middle East – Past, Present and Future.

Önal, B., & Ünal, Y. (2003). Climate Simulation of Türkiye and Its Neighborhood by Regional Climate Model:Sensitivity of Surface Conditions. Nice.

Önol, B., & Unal, Y. (2014). Assessment of climate change simulations over climate zones of Türkiye. *Regional Environmental Change,* 14, 1921-1935.

Ünal, Y. S., Karaca, M., & Dalfes, N. (2000) Regional Climate Change due to the Southeastern Anatolian Project in Türkiye', International Meeting on 'Detection and Modeling of Recent Climate Change and its Effects on a Regional Scale.

Ünal, Y.S.; Önol, B.; Karaca, M.; Dalfes N., (2001). 21. Yüzyılda GAP Havzalarının Iklimi: Orta Ölçekli Bir Modelle Simülasyonlar. İTÜ Araştırma Fonu Projesi.

Ünal, Y.S.; Önol, B.; Menteş.S.; Borhan, Y.; Kahraman, A.; Ural, D. (2010) Küresel İklim Değişikliğinin Türkiye'ye Etkilerinin Bölgesel İklim Modeli ile İncelenmesi.

Ünal, Y., Önol, B., Menteş, S., Borhan, Y., Kahraman, A., & Ural, D. (2010). Küresel İklim Değişikliğinin Türkiye'ye Etkilerinin Bölgesel İklim Modeli ile İncelenmesi. TUJJB-TUMEHAP-02-06, 2006-2010. Türkiye Ulusal Jeodezi ve Jeofizik Birliği.

Ünal, Y., & Yürük, C. (2017). Changes in Precipitation extremes in High Resolution Simulations of COSMO-CLM driven by MPI-ESM-LR under RCP8.5 scenario.

Van Vuuren, vd., (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Clim. Change*, 109, 5-31.

Yürük, C. (2016). COSMO-CLM (CCLM) climate simulations over Türkiye: Performance evaluation and climate projections for the 21st century. (Master thesis). Istanbul Technical University, Graduate School of Science, Istanbul.

Yürük, C., & Ünal, Y. (2016). Changes in Temperature extremes in High Resolution Simulatıons of COSMO-CLM driven by MPI-ESM-LR under RCP8.5 scenario over Western Türkiye. MedVLIVAR 2016 Conference. Atina.

Yürük, C., & Ünal, Y. (2017). Performance Evaluation of COSMO-CLM (CCLM) over Istanbul. COSMO/CLM/ICON/ART User Seminer. Offenbach.

## Yazar Hakkında / About Author

**Prof. Dr. Yurdanur ÜNAL | İstanbul Teknik Üniversitesi |**
**sunal[at]itu.edu.tr | ORCID 0000-0003-2006-1372**

Yurdanur Ünal, 1995 yılından itibaren öğretim üyesi olduğu İstanbul Teknik Üniversitesi Meteoroloji Mühendisliği Bölümünde Profesör olarak görev yapmaktadır. Dr. Ünal, lisans derecesini İstanbul Teknik Üniversitesi, Meteoroloji Mühendisliği Bölümü'nden aldı. Yüksek lisans ve doktora çalışmalarını Los Angeles'ta Kaliforniya Üniversitesinde (UCLA) Atmosfer Bilimler alanında tamamladı. Doktora çalışmasında küresel deniz seviyesi değişkenliği üzerinde çalıştı. 1996 ve 1998 yaz dönemlerinde UCLA, Atmosfer Bilimleri Bölümü, UC San Diego, Deneysel İklim Tahmin Merkezi ve 2001-2002 akademik yılında Chicago Üniversitesi Jeofizik Bilimleri Bölümü'nde misafir öğretim üyesi olarak araştırmalarına devam etti. Dr. Ünal, İTÜ, Türkiye ve Federal Acil Durum Yönetimi Ajansı, Amerika Birleşik Devletleri arasında "Eğitimle Tehlikelerin Etkilerini Azaltma Çabaları" projesi kapsamında "Eğitimcinin Eğitimi" eğitim programını tamamlamıştır. Kentsel ölçekten bölgesel ölçeğe iklim ve iklim değişkenliği üzerine araştırmalar yapmaktadır. Özellikle günümüz ve gelecek küresel iklim model simülasyonlarının bölgesel iklim modellemesi ile Türkiye üzerinde yüksek çözünürlükte analizi üzerine odaklanmaktadır. Birçok ulusal ve uluslararası düzeyde proje deneyimine sahiptir ve alanında lisans ve yüksek lisans öğrencilerine danışmanlık yapmaktadır.

**Prof. Dr. Yurdanur ÜNAL | İstanbul Technical University |**
**sunal[at]itu.edu.tr | ORCID 0000-0003-2006-1372**

Yurdanur Ünal is a Professor in the Department of Meteorological Engineering at the İstanbul Technical University (ITU) where she has been a faculty member since 1995. Dr. Ünal holds a BS degree from Istanbul Technical University, Meteorological Engineering. She obtained her MSc and Ph.D. at the University of California, Los Angeles (UCLA) in the area of Atmospheric Sciences. Her Ph.D. work focused on global sea level variability. She worked as a visiting scholar at UCLA, Atmospheric Science Department, UC San Diego, Experimental Climate Prediction Center for the summer periods of 1996 and 1998, respectively, and Chicago University, Department of Geophysical Sciences for the academic year 2001-2002. Dr. Unal completed the Train the Trainer Education Program coordinated as a bi-national project of "A Cooperative Hazard Impact-reduction Effort Via Education" between ITU, Türkiye, and the Federal Emergency Management Agency, the United States, and holds a certificate in Exercise Design. Her research interests lie in the area of climate change and variability, ranging from urban to regional scales, and regional climate modeling, especially downscaling Global Climate Model simulations over Türkiye for today's conditions and future under different emission scenarios. She completed several national and international projects and guided several undergraduate and graduate students.

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ
# VE
# TÜRKİYE İKLİM ÖLÇÜM AĞI

## CLIMATE CHANGE AND CLIMATE OBSERVATION SYSTEMS OF TÜRKİYE

*Hikmet EROĞLU*

DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch03

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE TÜRKİYE İKLİM ÖLÇÜM AĞI

***Hikmet EROĞLU***
*Meteoroloji Genel Müdürlüğü*

**Özet**

İklim; yeryüzünde uzun yıllar süresince gözlemlenen hava olaylarının ortalama durumudur. İklimde zaman içerisinde doğal veya yapay (insan) etki ile değişimler meydana gelmektedir. İklimde doğal faktörler nedeniyle meydana gelen değişimler iklim değişkenliği olarak tanımlanmaktadır. İklim değişkenliğinin doğal nedenleri arasında güneşteki patlamalar, dünyanın yörünge parametrelerindeki değişim ve volkanizma gibi durumlar yer almaktadır. İklimde insan kaynaklı değişime yol açan nedenler ise karbon içerikli fosil yakıtların kullanımı, plansız şehirleşme, sera gazı yutak alanı olan orman alanlarının giderek azalması olarak ifade edilmektedir. İklim değişikliği insan kaynaklı iklimde meydana gelen değişiklikle doğal nedenlerle iklimde meydana gelen değişikliğin bileşkesi olarak ifade edilebilir. Dünyada iklim değişikliği üzerine ilk çalışmalar 19. Yüzyılın ikinci yarısı itibari ile sera gazlarının yer kürenin ısınmasına etkileri üzerine yapılan çalışmalar ile başlamış, 1988 yılında, Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından başlatılan girişim sonucu Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) kurulmuş ve bu panelle birlikte iklim değişikliği konusunda hızlı bir ilerleme kaydedilmiştir. 1997 yılında Kyoto Protokolünün kabulü ve 2015 yılında Paris Anlaşması ile iklim değişikliğine karşı uluslararası bir mücadele planlanmıştır. Ulusal olarak 2022 yılında Birinci İklim Şurası, iklim değişikliğiyle mücadele ve yeşil kalkınma hedefleri doğrultusunda yapılmıştır. Kurumsal olarak İklim değişikliğine karşı Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) bünyesinde İklim Değişikliği ve Değişebilirliği Birimi 1991 yılında kurulmuştur. 1992 yılında ise Atmosferin Korunması ve İklim Değişikliği raporu yayımlanmıştır. Bu raporun Türkiye'de iklim değişikliği ile ilgili hazırlanan ilk rapor olması önem arz etmektedir. 2008 yılında TÜBİTAK projesi çerçevesinde, Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) ve İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) iş birliği ile Türkiye çapında ilk geniş kapsamlı projeksiyon çalışması yapılmıştır. 2012 yılında ise Türkiye Kamu Kurumları arasında ilk kez Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından geniş ölçekli iklim projeksiyonları çalıştırılmıştır. Çalışma kapsamında, 3 farklı küresel iklim modelinin çıktıları kullanılarak dinamik ölçek küçültme yöntemiyle 20 km yatay çözünürlükte 2 farklı senaryo (RCP4.5 ve RCP8.5) için bölgesel iklim modeli ile simüle edilmiştir. Çalıştırılan iklim projeksiyon verilerinin altlığını oluşturan iklim verileri, MGM'nin ülkemiz genelinde yer alan 2054 adet gözlem sisteminden elde edilen meteorolojik verilerdir.

***Anahtar Kelimeler***
*İklim, İklim değişikliği, Meteoroloji, Gözlem sistemleri*

# CLIMATE CHANGE AND CLIMATE OBSERVATION SYSTEMS OF TÜRKİYE

***Hikmet EROĞLU***

*Turkish State Meteorological Service*

**Abstract**

Climate is the average state of weather events observed on earth over many years. Changes occur in climate over time with natural or antropological (human) effects. Shifts in climate due to natural factors are defined as climate variability. Natural causes of climate change include solar eruptions, changes in the earth's orbital parameters, and volcanism. The use of carbon-containing fossil fuels, unplanned urbanization, and the steady disappearance of forested areas that act as greenhouse gas sinks are the causes of human-induced changes in the climate. The term "climate change" refers to both driven on by human activity and the change in the climate carried on by natural factors. During the latter half of the 19th century, researches on the impact of greenhouse gases on global warming provided the basis for the first studies on climate change. The studies gained momentum following the establishment of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in 1988, which was initiated by the World Meteorological Organization (WMO) and the United Nations Environment Programme (UNEP). With the 1997 approval of the Kyoto Protocol and the 2015 adoption of the Paris Agreement, an international struggle against climate change has been planned. Nationally, the First Climate Council in 2022 was held in line in an effort to fight climate change and promoting green development. Institutionally, the Climate Change and Changeability Unit was established in 1991 under the Turkish State Meteorological Service (TSMS) against climate change. In 1992, the Atmospheric Conservation and Climate Change report was published. The importance of this report is that it is the first report on climate change published in Türkiye. In 2008 for the first time, a comprehensive projection analysis was conducted as a TUBITAK project with the cooperation of TSMS - ITU. In 2012, for the first time as a public institution, the TSMS runned large-scale climate projections in Türkiye. Within the scope of projection studies, 3 global climate models outputs were simulated with a regional climate model using 2 different scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) at 20 km horizontal resolution with the dynamic downscaling method. The climate data, which form the basis of the climate projection data operated, are the data contributed to the global climate models from 2054 observation systems of TSMS located throughout Türkiye.

***Keywords***

*Climate, Climate change, Meteorology, Observation systems*

## 1. İklim Değişikliği Safahatı

İklim; uzun yıllar süresince gözlemlenen hava olaylarının ortalama durumu olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde hemen her sektörün en önemli çalışma konularından biri olan iklim değişikliği çalışmalarının geçmişi 1800'lü yılların ikinci yarısına dayanmaktadır. İklim değişikliği ile ilgili ilk çalışmalar sera gazlarının yer kürenin ısınmasına etkileri üzerine yapılan araştırmalar ile başlamıştır. 19. Yüzyılın sonlarında sera gazları emisyonlarının iklimde değişikliklere neden olabileceği tezinin ortaya atılması sera etkisinin keşfi olarak değerlendirilmiştir. Dünya çapında iklim üzerinde yapılan ilk çalışmalar 1896'da İsveçli bilim adamı Svante Arrhenius tarafından sera gazı etkisinin yeryüzü sıcaklığına etkileri üzerine hesaplamaları ile yapılmıştır. İklim değişikliğinin ana nedenlerinden olan $CO_2$ konsantrasyonlarının gözlemleri ise 1958 yılında Amerikalı bilim adamı David Keeling tarafından Hawai'de bulunan Mauna Loa gözlemevinde başlatılmıştır (Keeling, 1961). Uluslararası alanda iklim değişikliği konusunda çalışmalar yapan ilk kuruluş NASA'dır. NASA, 1969 yılında asit yağmurları ve sera gazları üzerine konuyla ilgili ilk araştırmaları başlatmıştır. 1979 yılında Dünya Meteoroloji Teşkilatı (WMO) öncülüğünde Birinci İklim Kongresi İsviçre'nin Cenevre kentinde düzenlenmiş ve iklim değişikliği ile ilgili küresel alanda ortak çalışmaların yapılması gerektiğine dair kararlar alınmıştır.

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), 1988 yılında, WMO ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından başlatılan girişimler sonucu, iklim değişikliği ile ilgili çalışmalar yapmak ve hükümetlere tarafsız ve güvenilir bilgi sağlamak amacıyla kurulmuştur. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS), 1992 yılında gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma konferansında imzaya açılmış ve 1994 yılında yürürlüğe girmiştir (UN, 1994). BMİDÇS'nin 1994 yılında yürürlüğe girmesi ile birlikte sözleşmeye taraf olan tüm ülkelerin katıldığı 1995 yılında Birinci Taraflar Konferansı (COP 1), sözleşmenin uygulanması ve gerekli yasal düzenlemelerin yapılması amacıyla Almanya'nın Berlin kentinde düzenlenmiştir. 1997 yılında Japonya Kyoto'da 3. Taraflar Kongresi (COP 3) düzenlenmiş ve ülkelerin 2000 yılı sonrası sera gazı salınımlarının düzenlendiği Kyoto Protokolü imzaya açılmıştır. Protokol gelişmiş ülkelere bağlayıcı hükümler getirmesi nedeniyle ancak 2005 yılında yeterli imza sayısına ulaşarak yürürlüğe girmiştir. Protokol, 2008-2012 birinci yükümlülük dönemi ve 2013-2020 ikinci yükümlülük dönemi olmak üzere iki safhadan oluşmuştur. 2015 yılında ise Paris'te düzenlenen COP 21 konferansında 2020 yılında ikinci yükümlülük dönemi bitecek olan Kyoto Protokolü sonrası yürürlüğe girmesi için Paris Anlaşması imzaya açılmış ve 2016 yılında yürürlüğe girmiştir. Türkiye, 2004 yılında BMİDÇS'ne, 2009 yılında Kyoto Protokolüne ve 2021 yılında Paris Anlaşmasına taraf olmuştur (MFA, 2022).

## 2. Türkiye'de İklim Değişikliği Çalışmaları Safahatı

İklim değişikliği konusunda ülkemizde ilk kurumsal çalışmalar 1991 yılında Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nde oluşturulan İklim Değişikliği ve Değişebilirliği Birimi tarafından başlatılmıştır. 1992 yılında Brezilya'nın Rio de Janeiro kentinde düzenlenen çevre ve kalkınma konferansına yönelik çalışmaların yürütülmesi amacıyla MGM'nin sekreteryasını üstlendiği Ulusal İklim Koordinasyon Grubu tarafından Türkiye'de iklim değişikliği konusunda hazırlanan "Atmosferin Korunması ve İklim Değişikliği" adıyla ilk rapor yayınlanmıştır (MGM, 1992). İklim Değişikliği Koordinasyon Kurulu (İDKK), 2001 yılında 2021/2 sayılı Başbakanlık Genelgesi ile kurulmuş ve iklim değişikliği ile ilgili politikaların, önlemlerin ve çalışmaların belirlenmesi için oluşturulmuştur. İDKK içerisinde sekretarya görevini Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) üstlenmiştir. 2011 yılında MGM'nin Orman ve Su İşleri Bakanlığı'na bağlanması ve İDKK'nın Çevre Bakanlığı altında görev yapmasına karar verilmesi sonucunda MGM'nin kurul içerisindeki sekretarya görevi son bulmuştur. 2013 yılında, 2013/11 sayılı Başbakanlık Genelgesi yeniden yapılandırılmış ve İDKK, İklim Değişikliği ve Hava Yönetimi Koordinasyon Kurulu (İDHYKK) olarak adlandırılmıştır. 2021 yılında ise bu kurul 85 sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi ile İklim Değişikliği ve Uyum Koordinasyon Kurulu ismiyle yeniden düzenlenmiştir. MGM, İDHYKK'da Uyum Grubu üyesi olarak görevine devam etmiştir.

MGM; 1994 yılında yürürlüğe giren ve Türkiye'nin 2004 yılında taraf olduğu BMİDÇS gereği Ulusal Bildirim Raporları hazırlanmasına katkı sunmuştur. Birinci Ulusal Bildirim 2007 yılında yayınlanmış olup, 2022 Ekim itibariyle Sekizinci Ulusal Bildirim için hazırlıklar devam etmektedir. 2008 yılında Ulusal ölçekte ilk geniş kapsamlı iklim değişikliği projeksiyon çalışması İTÜ Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü – MGM tarafından ortaklaşa yürütülen TÜBİTAK projesi ile yapılmıştır. 2012 yılında başlatılan iklim projeksiyonları çalışması ile; 2013 yılında bir küresel iklim modeline ait iklim projeksiyonlarının yer aldığı "Yeni Senaryolarla Türkiye İçin İklim Projeksiyonları" raporu hazırlanmıştır. 2015 yılında ise 3 Küresel İklim Modeli ve 2 senaryo (RCP 4.5, 8.5) temelinde hazırlanan rapor yayınlanmıştır (Akçakaya vd., 2015). 11 Aralık 2019 tarihinde Avrupa Birliği (AB) tarafından açıklanan Avrupa Yeşil Mutabakatının ardından Yeşil Mutabakat Eylem Planı 2021/15 Sayılı Cumhurbaşkanlığı Genelgesi ile yayınlanmıştır (TB, 2021). 2022 yılında ise iklim değişikliğiyle mücadele ve yeşil kalkınma hedefleri doğrultusunda Birinci İklim Şûrası düzenlenmiştir. Diğer yandan COP 27, 7-18 Kasım 2022 tarihleri arasında Mısır'da düzenlenmiştir. Ayrıca MGM; WMO koordinasyonunda Doğu Akdeniz İklim Merkezi (EMCC) yürütücüsü sıfatıyla bölge ülkelerine aylık-mevsimlik sıcaklık ve yağış tahminleri, iklim analiz verisi ve iklim izleme uyarı hizmetlerini sunmaktadır. Ayrıca MGM tarafından iklim değişikliği alanında sektörel çalışmalara katkı sağlayabilmek amacıyla-Türkiye genelinde ve coğrafi bölgeler özelinde şehircilik, tarım, su, sağlık, turizm ve enerji sektörleriyle ilgili 11 iklim indisinin geçmişten geleceğe frekans ve eğilimleri hesaplanarak rapor haline getirilmiştir.

## 3. İklim Modelleme ve Projeksiyon Çalışmaları

İnsanoğlu ilk çağlardan günümüze kadar karşılaştığı problemlere çözüm bulmak, evreni anlamak, doğayı kontrol etmek ve güvenli bir yaşam için soyut/somut modellerle deneyler yapma arzusu hissetmiştir. İklim, insanoğlunun tüm faaliyetlerini doğrudan etkilemekte ve şekillendirmektedir. Son yüzyıl boyunca insan faaliyetlerinin doğaya verdiği zararlar nedeniyle toprak, hava ve suyun bileşimi önemli ölçüde değişmiştir. (Kadıoğlu, 2009). Elektrik tüketimi, ısıtma ve endüstriyel yakıt kullanımı, kara ulaşımı, enerji kullanımı, su tüketimi, atık üretimi, ekonomik aktivite ve nüfus artışı gibi parametrelerle iklim arasında korelasyonlar kurulmuştur (Kennedy vd., 2015).

Modelleme, gerçeğe benzer simülasyonlar üretmektir. İklim modeli; atmosfer, yeryüzü, okyanus, kara ve buz kütlesi gibi iklim bileşenleri arasındaki ilişkiyi nicel metotlarla göstermeye çalışan model türüdür. Küresel iklim modeli tüm yerküreyi düşük çözünürlükte simüle eden iklim modeli tipidir. Küresel İklim Modellerinde (GCMs) yağış sistemleri veya cephe sistemleri gibi yerel ölçekli hava durumları ve atmosfer prosesleri tahmin edilememekte ya da çok temel düzeyde yer almaktadır. Sınırlı alanlarda elde bulunan hesaplama kapasitesini optimum düzeyde kullanmak ve bahsedilen eksikliklerdeki hataları azaltmak amacıyla Bölgesel İklim Modellerinden (RCMs) yararlanılmaktadır. RCM'ler düşük çözünürlüklü gridlenmiş GCM verilerini, girdi verisi olarak kullanarak GCM'lere göre daha küçük alanlar için daha yüksek çözünürlüklü çıktılar üretilmesini sağlayan modeller olarak tanımlanmaktadır. 2012 yılında MGM'nin başlattığı iklim projeksiyonları çalışmasında 14 farklı GCM Türkiye özelinde karşılaştırılmış ve Türkiye için 3 GCM (MPI-ESM-MR - Almanya, HadGEM2-ES - İngiltere ve GFDL-ESM2M - ABD) seçilmiştir. RCM olarak İtalya Uluslararası Abdüsselam Teorik Fizik Merkezi (ICTP) tarafından geliştirilen RegCM Bölgesel İklim Modeli seçilmiştir. RegCM ile Türkiye ölçeğinde 20 km çözünürlüklü projeksiyonlar üretilmiştir. Türkiye özelinde her 3 GCM için yapılan parametrizasyon işlemi sonucunda modelin doğruluğunun sınanması için CRU – (Climater Resaerch Unit – ABD Doğu Anglia Üniversitesi) ve UDEL (University of Delaware – ABD) (Harris vd., 2013; Trenberth vd., 2014) Küresel Gridlenmiş Gözlem Verileri ile model sonuçları karşılaştırılarak Türkiye özelinde en uygun parametrizasyon şeması hazırlanmıştır. Çalışmada 1971 -2000 dönemi referans, 2015 – 2098 dönemi ise gelecek projeksiyon dönemi olarak seçilmiştir. 2015 yılında tamamlanan projeksiyon çalışmaları tüm paydaşların kullanımına sunulmuştur (Akçakaya vd., 2015; Gürkan vd., 2016; Demircan vd., 2017).

## 4. İklimde Mevcut Durum

Küresel ortalama sıcaklıklar WMO Küresel 2021 yılı iklim raporu kayıtlarına göre endüstri öncesi dönem (1850-1900) ortalamalarının 1.11°C üzerinde ölçülmüştür. Deniz seviyesi yükselme hızı 2013-2021 döneminde 4.5 mm/yıl değeri ile en yüksek değerine ulaşmıştır. Küresel deniz seviyesi 1993 yılından günümüze 100 mm'den fazla yükselmiştir. Ekstrem sıcaklık, kuvvetli fırtına, taşkın ve sel başta olmak üzere meteorolojik afetler tüm dünyada can ve mal kayıplarına sebep olmuştur. Okyanus sıcaklık verilerine göre ise 1955 yılından 1995'e kadar önemli bir ısınma yaşanmıştır (Kadıoğlu, 2007). Kuraklık dünyada Türkiye'nin de içinde olduğu farklı bölgelerde tarımsal üretimde ciddi kayıplara yol açmıştır (WMO, 2022).

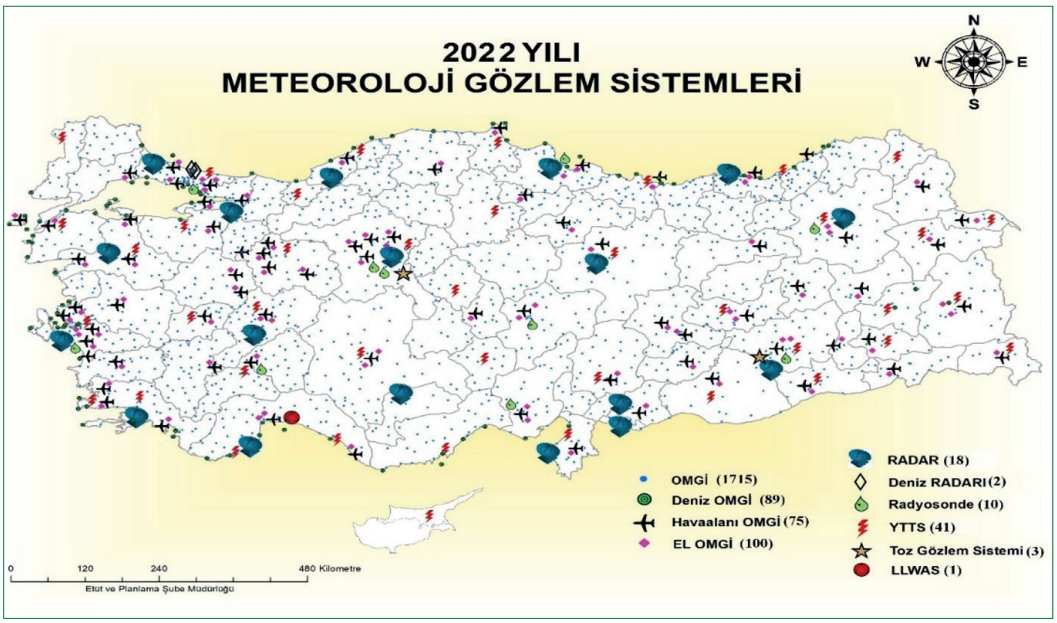
Türkiye'de en sık rastlanan meteorolojik doğal afetler arasında yıldırım, kar, sel, taşkın, dolu, çığ, orman yangınları, kuraklık, şiddetli yağış, don, şiddetli rüzgâr ve fırtınalar yer almaktadır (Kadıoğlu, 2008). Türkiye iklim şartlarına bakıldığında, coğrafi konumu itibari ile Hadley hücresinin çöken kolunun bulunduğu enlem ile polar cephenin etkili olduğu enlemler arasında, batılı rüzgarların hâkim olduğu ve Kuzey Atlantik salınımlarının aktif olduğu bir bölgede bulunmaktadır. Türkiye ve çevresini etkileyen farklı atmosferik durumların Türkiye'nin yüksek topoğrafyası ile etkileşimi nedeniyle bölge bazında büyük iklimsel farklılıklar yaşanmaktadır (Kadıoğlu vd., 2017). Ülkemizde ise MGM değerlendirmelerine göre 2021 yılı Türkiye ortalama sıcaklığı 14.9°C olarak gerçekleşmiş olup bu değer 1991–2020 iklim ortalamasının 1.0°C üzerindedir. 2010 yılı ise 15.5°C sıcaklık ortalaması ile en sıcak yıl olmuştur. 2021 yılı en sıcak 4. yıl olmuştur. 2021 yılı ülkemiz alansal yağış toplamı 524.8 mm olarak ölçülmüş olup 1991-2020 iklim normaline (573.4) göre kıyaslandığında %9 altında gerçekleşmiştir. 2021 yılı, 1024 toplam ekstrem olay ile en fazla ekstrem olayın gerçekleştiği yıl olmuştur. Ekstrem hadise trendleri incelendiğinde özellikle 2000 yılı sonrasındaki artış eğimi göze çarpmaktadır. 2021'de kaydedilen başlıca ekstrem olaylar;

- %40 fırtına/hortum,
- %28 şiddetli yağış/sel,
- %13 dolu ve
- %7 şiddetli kar şeklinde olmuştur (MGM, 2022a).

## 5. Türkiye İklim Ölçüm Ağı

MGM 2022 yılı Ekim ayı itibariyle Türkiye genelinde 2054 adet gözlem sisteminden ölçülen meteorolojik verilerle atmosferi 7/24 izlemekte, hazırladığı tahmin ve erken uyarılar ile kamuoyunu bilgilendirmektedir. MGM bünyesinde 2022 yılı Ekim ayı itibariyle;

- 1715 Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu (OMGİ),
- 89 Deniz Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu (D-OMGİ) (79 Deniz Feneri, 10 Şamandıra),
- 75 Havaalanı Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu (H-OMGİ),
- 100 Elde Taşınabilir Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu (EL-OMGİ),
- 20 Meteoroloji Radarı (17 C-Band Meteoroloji Radarları, 1 X-Band Meteoroloji Radarı ve 2 Yüksek Frekanslı (HF) Deniz Radarı),
- 10 Yüksek Atmosfer Gözlem İstasyonu (Radyosonde),
- 41 Yıldırım Tespit ve Takip Sistemi (YTTS),
- 1 Alçak Seviye Rüzgâr Kırılımı Uyarı Sistemi (LLWAS),
- 3 Toz Gözlem Sistemi (TGS) bulunmaktadır (Şekil 1) (MGM, 2022b).



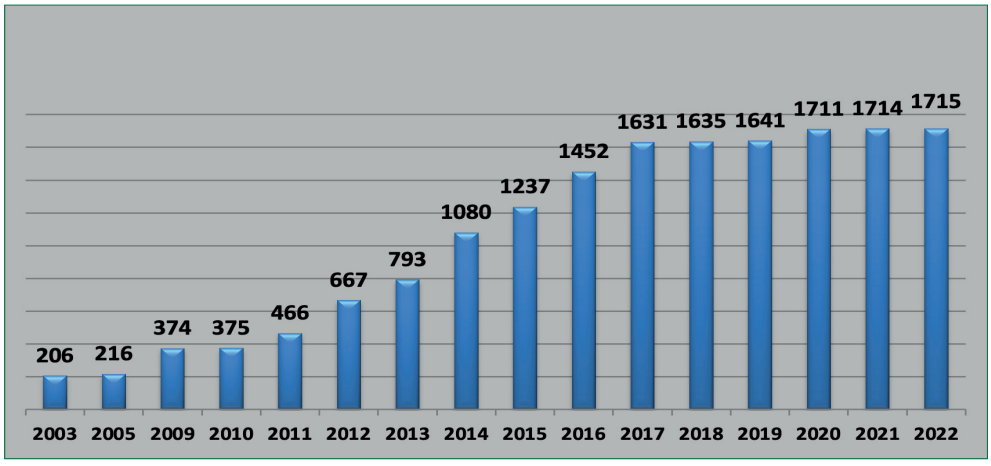

***Şekil 1.*** *Meteoroloji Genel Müdürlüğü gözlem sistemleri*

## 6. Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu (OMGİ)

Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonları (OMGİ) havanın sıcaklığı, nem oranı, rüzgâr hızı ve yönü, atmosfer basıncı, yağış miktarı, görüş mesafesi gibi meteorolojik özellikleri ölçmek için kullanılan cihazlardır. OMGİ'ler meteorolojik ölçümlerde meydana gelen değişimlere duyarlı olan ve bu değişimleri ölçebilen algılayıcıları, veri toplama, işleme ve arşivleme üniteleri, iletişim, görüntüleme ve enerji ünitelerini içeren cihazlardır. OMGİ içerisinde bulunan sensörlerin ölçümleri, ürettiği elektriksel ölçümleri ve mühendislik birimlerini (voltaj, akım, direnç vb.) meteorolojik bilgilere ve birimlere dönüştürmek için ana işlem ünitesi tarafından hesaplanır ve dönüştürülür. Bu bilgiler, görüntüleme birimleri tarafından gösterilir ve meteorolojik bilgi ve mesajların ilgili merkezlere iletilmesini sağlayan haberleşme birimleriyle sistemin çalışması için gerekli enerjiyi sağlayan güç birimleriyle birlikte yer alır (Şekil 2). OMGİ'lerde meteorolojik parametre olarak hava sıcaklığı, nisbi nem, rüzgâr hızı ve yönü, halihazır hava durumu, yağış miktarı ve cinsi, hava basıncı, kar kalınlığı, güneş radyasyonu, güneşlenme süresi, toprak sıcaklığı, toprak nemi ve buharlaşma parametreleri ölçülmektedir. OMGİ'ler değişik tip ve özellikleri ile farklı amaçlar için kullanılmaktadır. OMGİ'ler, vatandaşlara anlık hava durumu bilgilerinin aktarılması, tahminlerin hazırlanması ve tutarlılıklarının artırılması, iklim ve iklim değişikliğiyle ilgili araştırmaların yapılması, farklı sektörlere yönelik meteorolojik ürün ve hizmetlerin hazırlanması gibi çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. MGM'de 2022 yılı Ekim ayı itibariyle 1715 adet OMGİ'den dakikalık veri üretilmektedir (Şekil 3).



***Şekil 2.*** *Ankara Bölge Müdürlüğü OMGİ istasyonu*



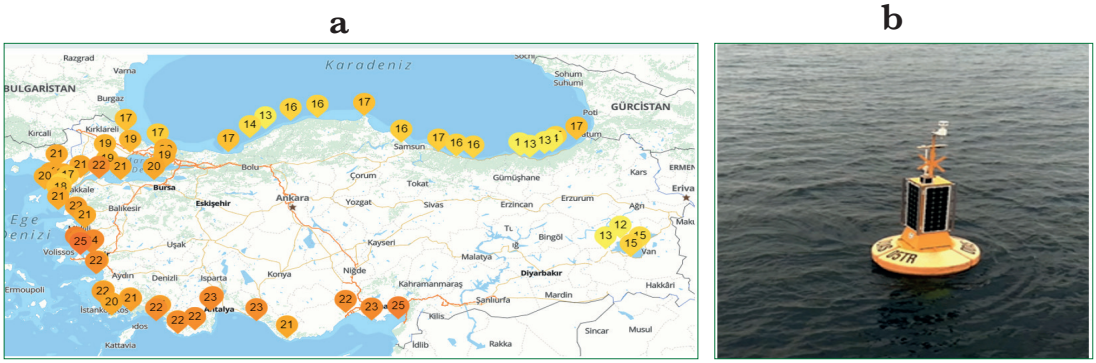

***Şekil 3.*** *2002-2022 Yılları arasındaki MGM bünyesinde bulunan OMGİ sayısı gelişimi*

## 7. Deniz Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu (D-OMGİ)

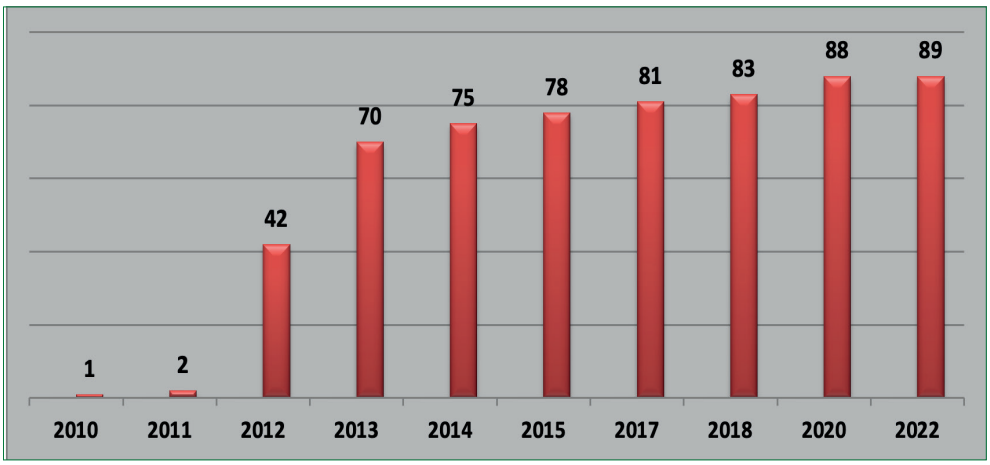
Türkiye denizcilik sektörüne hizmet etmek amacıyla deniz fenerleri ve şamandıralar üzerine 89 adet D-OMGİ sistemi yerleştirilmiştir. Bu sistemler aracılığıyla sıcaklık, nem, rüzgâr hızı ve yönü, atmosfer basıncı ve deniz suyu sıcaklığı gibi meteorolojik parametreler ölçülerek denizcilik faaliyetlerine yönelik meteorolojik ürün ve hizmetler de hazırlanmaktadır (Şekil 4,5). 10 adet şamandıra, meteorolojik parametrelerin yanı sıra dalga ölçer, akıntı ölçer, tuzluluk ve iletkenlik algılayıcılarını da içermektedir.

## 8. Havaalanı Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu (H-OMGİ)

Havaalanlarında, havacılık faaliyetleri için önemli olan meteorolojik bilgi ve hizmetlerin hazırlanması için H-OMGİ sensörleri kullanılmaktadır. Bu sensörler genellikle pist ve çevresine konuşlandırılır. Uçuş güvenliği için gereksinim duyulan meteorolojik bilgi ve hizmetler, H-OMGİ sensörleri aracılığıyla sağlanır. Basınç, güneş radyasyonu, nem, sıcaklık ve yağış ölçen sensörleri içeren bir rasat parkı aktif pist başında bulunmaktadır. H-OMGİ sistemlerinde, her iki pist başında yer alan algılayıcılar sayesinde rüzgar hızı ve yönü tespit edilirken, silyometre ile bulut taban yüksekliği ölçülmekte ve transmisyometre cihazları aracılığıyla pist görüş mesafesi (Runway Visual Range - RVR) belirlenmektedir. Ayrıca, H-OMGİ sistemi içinde, halihazır hava parametreleri de ölçülmekte ve bulut taban yüksekliği ile pist görüş mesafesi gibi bilgilerle birlikte havacılık faaliyetleri için gerekli meteorolojik bilgiler ve hizmetler sunulmaktadır (Şekil 6). Aktif pist başında kurulu olan transmisyometre cihazı üzerinde hâlihazır hava sensörü ve pist içine yerleştirilmiş pist sıcaklık sensörleri de mevcuttur.




***Şekil 4. a)*** *D-OMGİ İstasyonlarından alınan verilerin harita üzerinde gösterimi* ***b)*** *Şamandıra üzerinde bulunan D-OMGİ istasyonu*

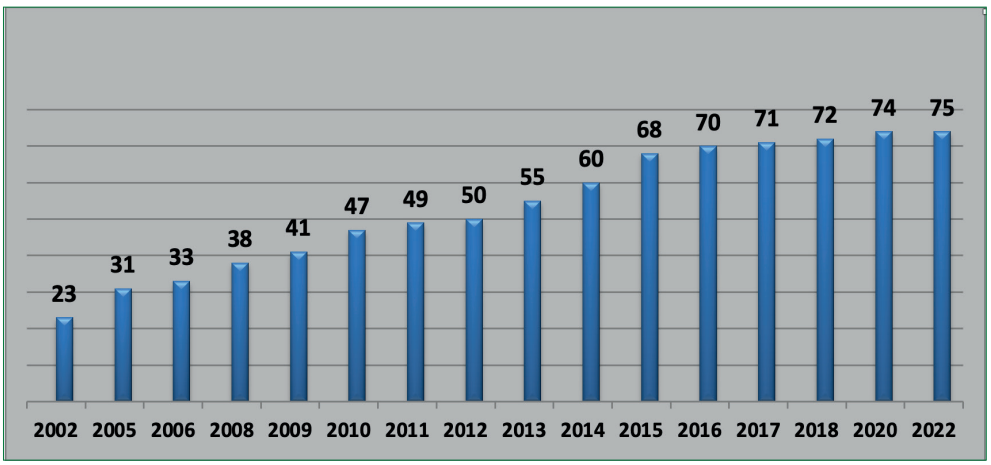



***Şekil 5.*** *2002-2022 Yılları arasındaki MGM bünyesinde bulunan D-OMGİ sayısı gelişimi*

2022 yılı Ekim ayı itibariyle, 75 havalimanında H-OMGİ'lerden gözlem verileri toplanmakta ve havacılık sektörüne hizmet sunulmaktadır (Şekil 7). Bu sensörler genellikle pist ve çevresine konuşlandırılır. Uçuş güvenliği için gereksinim duyulan meteorolojik bilgi ve hizmetler, H-OMGİ sensörleri aracılığıyla sağlanır.



***Şekil 6.*** *Havaalanı H-OMGİ istasyonu*




***Şekil 7.*** *2002-2022 Yılları arasındaki MGM bünyesinde bulunan H-OMGİ sayısı gelişimi*

## 9. Elde Taşınabilir Otomatik Meteoroloji Gözlem İstasyonu (EL-OMGİ)

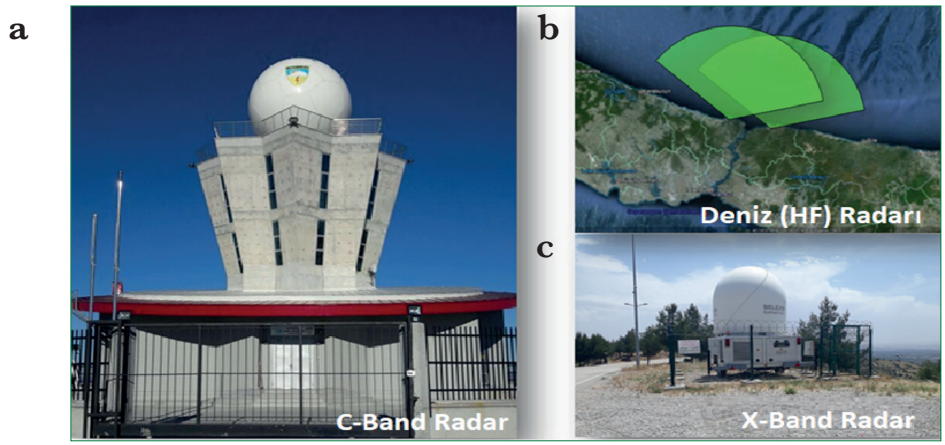
Meteoroloji Bölge Müdürlükleri ve havalimanlarında mevcut sistemlerin arızalanması durumunda kullanılmak üzere 100 adet EL-OMGİ hizmete alınmıştır (Şekil 8). EL-OMGİ'ler, hava sıcaklığı, hava nemi, rüzgâr yönü ve hızı ile basınç parametrelerini ölçmektedir.



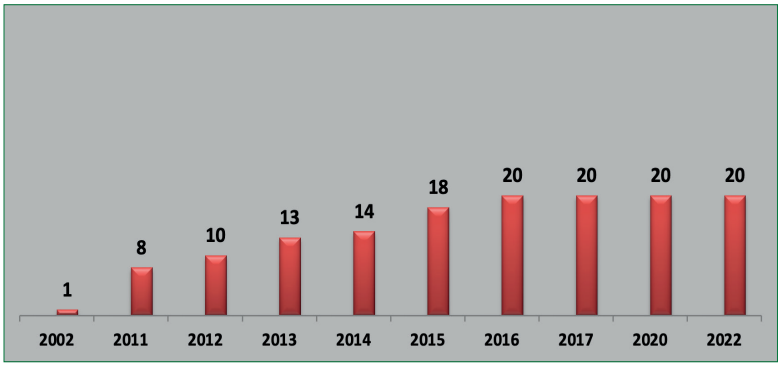
***Şekil 8.*** *Elde Taşınabilir EL-OMGİ istasyonu*

## 10. Meteoroloji Radarları

Meteoroloji radarı, hava kütlelerinin yerini, hareket yönünü, hızını ve yoğunluğunu tespit etmek için kullanılan bir aktif uzaktan algılama sistemidir. Bu sayede, bu kütlelere ilişkin tahminler yapmak için gerekli bilgiler sağlanır. Radarlar, özellikle geniş ölçekli, yüksek çözünürlüklü meteorolojik gözlemlerin ve tahminlerin yapılabilmesi, aynı zamanda hava tahmin modellerinin girdi verilerinin elde edilebilmesi için önemli bir meteorolojik gözlem sistemidir. Radarlardan, kısa süreli yüksek başarımlı hava tahminlerinin yanı sıra birçok meteorolojik ihtiyaç için veri sağlamak mümkündür. MGM radar ağında şu anda 17 adet C-Band ve 1 adet X-Band meteoroloji radarı bulunmaktadır. Denizlerimizdeki dalga, rüzgâr ve akıntı gibi parametreleri ölçmek için geniş bir alanda uzaktan algılama yöntemiyle veri toplamak amacıyla, İstanbul Boğazı'nın Karadeniz kıyısına 2 adet Deniz Radarı kurulmuştur. Bu sayede 3 tarafımızı çevreleyen denizlerdeki hava koşulları daha iyi izlenebilmektedir. Bu uzaktan algılama sistemleri aracılığıyla, her yarım saatte bir denizlerimizdeki akıntı hızı ve yönü, dalga yüksekliği ve yönü, rüzgâr hızı ve yönü verileri ölçülebilmektedir (Şekil 9, 10).



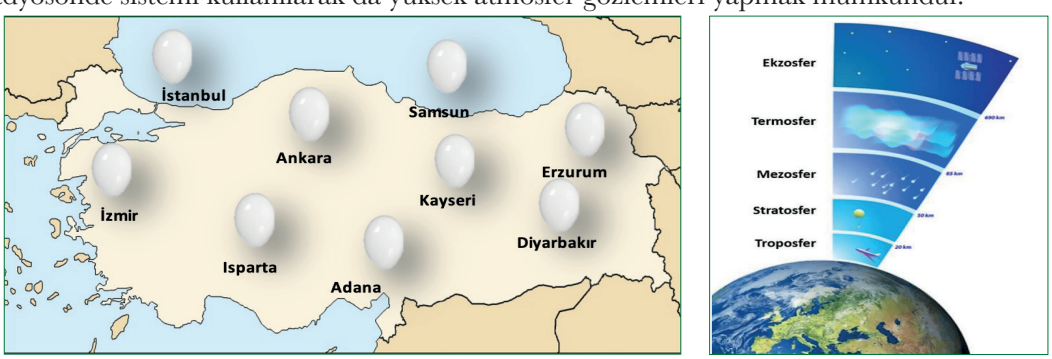

***Şekil 9. a)*** *C-Band,* ***b)*** *X-Band ve* ***c)*** *Deniz radarları*




***Şekil 10.*** *2002-2022 Yılları arasındaki MGM bünyesinde bulunan radar sayısı gelişimi*

## 11. Yüksek Atmosfer Gözlem İstasyonu (Radyosonde)

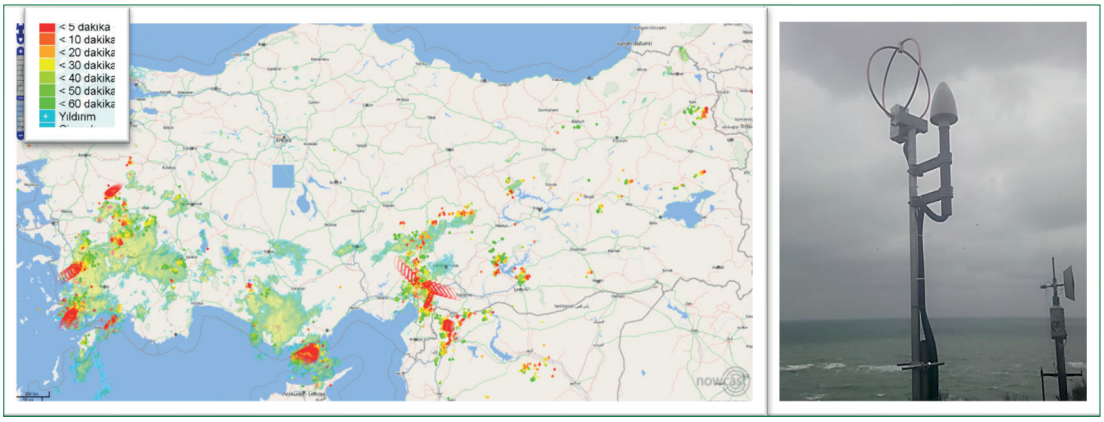
Meteorolojik hava tahmini raporlarının hazırlanması ve uçuş güvenliği için gerekli olan kritik meteorolojik veri ve hizmetlerin sağlanması amacıyla, yüksek atmosfer verilerinin elde edilmesi büyük önem taşır. Bu amaç doğrultusunda, 35 kilometre yüksekliğe kadar olan atmosferdeki sıcaklık, rüzgâr, nem ve basınç seviyelerinin yükseklik bilgilerinin elde edilmesinde yüksek atmosfer gözlem sistemleri kullanılmaktadır. Türkiye'de yüksek atmosfer gözlemleri 2022 yılı Ekim ayı itibariyle 9 istasyonda yapılmaktadır. (Şekil 11). Gerek olduğunda, 1 adet seyyar radyosonde sistemi kullanılarak da yüksek atmosfer gözlemleri yapmak mümkündür.




***Şekil 11.*** *Yüksek Atmosfer Gözlemi (Radyosonde) yapılan lokasyonlar*

## 12. Yıldırım Tespit Ve Takip Sistemi (YTTS)

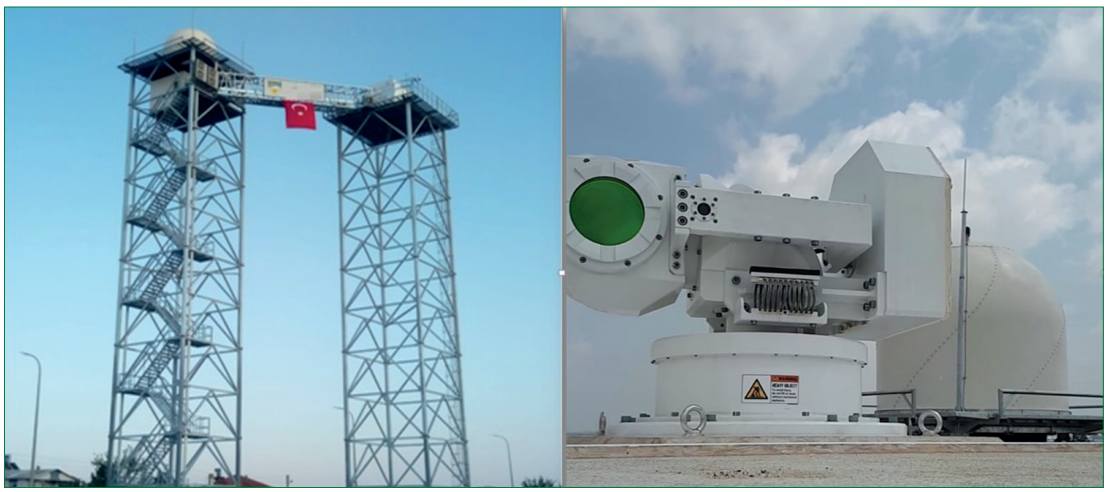
MGM tarafından kullanılan yıldırım tespit ve takip sistemi, hava tahmini ve özellikle kısa süreli hava tahmini üretimi (Nowcasting) ile birlikte yıldırım ve şimşek olaylarının tespiti ve izlenmesi için kullanılan, gerçek zamanlı ve yüksek çözünürlüklü meteorolojik verileri elde etmek amacıyla kurulmuş bir pasif uzaktan algılama sistemidir. Bu sistem sayesinde yıldırım ve şimşeğin lokasyonu, türü, sinyal şiddeti, polaritesi ve şimşek yüksekliği bilgileri gerçek zamanlı ve yüksek çözünürlüklü olarak elde edilebilmektedir. Şu an 41 farklı yerde kurulu olan YTTS sensörleri tarafından sağlanan sonuçlar tarım, havacılık, milli savunma, enerji, sigortacılık ve ulaştırma gibi birçok farklı sektöre yönelik hizmetler için kullanılmaktadır. (Şekil 12).




***Şekil 12. a)*** *Yıldırım Tespit ve Takip Sistemi Harita üzerinde gösterimi* ***b)*** *Yıldırım Tespit ve Takip Sistemi Sensörü*

## 13. Alçak Seviye Rüzgar Kırılımı Uyarı Sistemi (LLWAS)

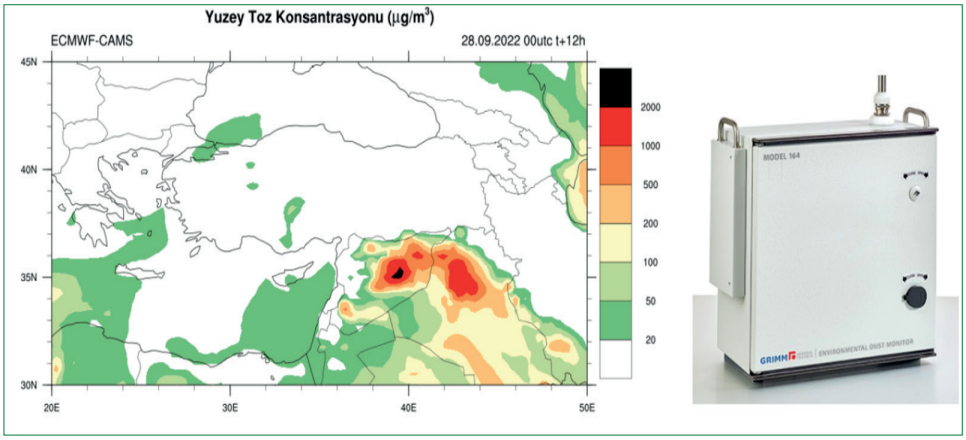
Uçakların iniş ve kalkışlarında önemli olan, alçak irtifada meydana gelen rüzgar kırılımlarının uçuş güvenliği için raporlanması ve uyarı verilmesi amacıyla 2019 yılında Antalya Havalimanında bir adet LLWAS sistemi kurulmuştur (Şekil 13).



***Şekil 13.*** *Alçak seviye rüzgâr kırılımı uyarı sistemi LLWAS cihazı*

## 14. Toz Gözlem Sistemi (TGS)

Çöl kaynaklı tozlar atmosferdeki üst tabakalara meteorolojik koşullar etkisiyle taşınmakta ve yatay olarak uzun mesafeler katetebilmektedir. Bu nedenle Orta Doğu ve Afrika kaynaklı çöl tozlarının takibine yönelik Ankara, Şanlıurfa ve Muğla illerimizde 3 adet TGS kurulmuştur (Şekil 14).




***Şekil 14. a)*** *Toz Gözlem Sistemi harita üzerinde gösterimi* ***b)*** *Toz Gözlem Sistemi cihazı*

## 15. Antarktika Ulusal Bilim Seferi

Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı sorumluluğu ve İTÜ koordinesinde 3. Ulusal Antarktika Bilim Seferi'ne MGM tarafından katılım sağlanarak 1 adet OMGİ kurulumu yapılmıştır (Şekil 15).

***Şekil 15. a)*** *Antarktika seferinde kurulan OMGİ istasyonu* ***b)*** *OMGİ istasyonundan alınan anlık gözlem veriler görseli*




## 16. Kalibrasyon Merkezi (KALMER)

MGM Kalibrasyon Merkezi; sıcaklık, nem, basınç ve rüzgâr hızı gibi parametrelerin kalibrasyon hizmetlerini sunmakta ve TS-EN ISO/IEC 17025 standartlarına uygun olarak faaliyet göstermektedir. Ayrıca, Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK) tarafından akredite edilmiş küresel güneş radyasyonu, rüzgâr yönü, yağış ve elektriksel kalibrasyon laboratuvarları gibi toplam 8 laboratuvarı vardır. Bu sayede kalibrasyon işlemleri takip edilebilmekte ve güvenilir sonuçlar elde edilmektedir (Şekil 16). KALMER, meteoroloji gözlem ağına dahil olan OMGİ'lere ait sensörlerin yanı sıra, kamuya ve özel sektöre ait kalibrasyon taleplerine de yanıt vermektedir. KALMER, Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından 2018 yılında Bölgesel Alet Merkezi olarak kabul edilerek, yurt dışındaki meteorolojik aletlerin kalibrasyonu için hizmet verme yetkisine de sahip olmuştur.




***Şekil 16.*** *Meteoroloji Genel Müdürlüğü Kalibrasyon Merkezi*

## 17. Sonuçlar

İklim, bir coğrafya parçasının meteorolojik kimliğidir. Uzun yıllar boyunca gözlemlenen meteorolojik parametrelerin ortalamasını ifade eden bir denge halidir. Aynı zamanda ekstrem meteorolojik değerleri de içinde barındırarak salınım aralığını tanımlar. İklim değişikliği çalışmaları 1850'li yıllarda başlamıştır. Ülkemizde ise ilk çalışmalar 1991 yılında Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) bünyesinde oluşturulan İklim Değişikliği ve Değişebilirliği Birimi tarafından başlatılmıştır. MGM'de tarihsel iklim çalışmalarının yanı sıra gelecekte iklimde ne tür değişiklikler meydana gelebileceğinin ortaya konması adına iklim modelleri çalışmaları yapılmaktadır. Bu modeller kullanılarak oluşturulan iklim projeksiyon çalışmaları 2015 yılında tamamlanarak tüm paydaşların kullanımına sunulmuştur. İklim izleme, modelleme, hava tahmini ve erken uyarı raporları gibi çalışmaların temelini oluşturan veri ölçümleri, MGM tarafından 2022 yılı Ekim ayı itibariyle Türkiye genelinde yer alan 2054 adet gözlem sisteminden sağlanarak kamuoyuna sunulmaktadır. Bu gözlem sistemlerini ise otomatik meteoroloji gözlem istasyonları, deniz otomatik meteoroloji gözlem istasyonları, havaalanı otomatik meteoroloji gözlem istasyonları, elde taşınabilir otomatik meteoroloji gözlem istasyonları, meteoroloji radarları, yüksek atmosfer gözlem istasyonları, yıldırım tespit ve takip sistemleri, alçak seviye rüzgâr kırılımı uyarı sistemi ve toz gözlem sistemleri oluşturmaktadır. Bu çalışmada ifade edilen MGM gözlem sistemlerinin iklim gözlem ağı olarak yerli bir iklim araştırmaları merkezi ile bütünleşik bir yapıda değerlendirilmesi kapsamında çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

## 18. Kaynaklar / References

Akçakaya, A., Sümer, U.M., Demircan, M., Demir, Ö., Atay, H., Eskioğlu, O., Gürkan, H., Yazıcı, B., Kocatürk, A., Şensoy S., Bölük, E., Arabacı, H., Açar, Y., Ekici, M., Yağan, S., & Çukurçayır, F. (2015). Yeni Senaryolarla Türkiye İklim Projeksiyonları ve İklim Değişikliği-TR2015-CC. MGM, 149 syf, Ankara. https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/iklim-degisikligi-projeksiyon2015.pdf. Erişim tarihi: 16.02.2023

Demircan, M., Gürkan, H., Eskioğlu, O., Arabacı, H., & Coşkun, M. (2017).Climate Change Projections for Türkiye: Three Models and Two Scenarios. *Türkiye Su Bilimi ve Yönetimi Dergisi*, 1(1), 22-43. DOI: 10.31807/tjwsm.297183

Gürkan, H., Arabacı, H., Demircan, M., Eskioğlu, O., Şensoy, S., & Yazıcı, B. (2016). GFDL-ESM2M Modeli Temelinde RCP4.5 ve RCP8.5 Senaryolarına Göre Türkiye için Sıcaklık ve Yağış Projeksiyonları. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 14(2), 77-88. DOI: 10.1501/Cogbil_0000000174

Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J. & Lister, D.H. (2013). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol*. doi: 10.1002/joc.3711

Kadıoğlu, M. (2007). İklim değişiklikleri ve etkileri: meteorolojik afetler, TMMOB Afet Sempozyumu

Kadıoğlu, M. (2008). Sel, Heyelan ve Çığ için Risk Yönetimi. Afet Zararlarını Azaltmanın Temel İlkeleri, Ankara: JICA Türkiye Ofisi Yayınları No: 2, 251–276.

Kadıoğlu, M. (2009). Küresel İklim Değişimi Ve Türkiye. Engineer & the Machinery Magazine, (593).

Kadıoğlu, M., Ünal, Y., İlhan, A., & Yürük, C. (2017). Türkiye'de iklim değişikliği ve tarımda sürdürülebilirlik. Türkiye Gıda ve İçecek Sanayi Dernekleri Federasyonu

https://www.tgdf.org.tr/wpcontent/uploads/2017/10/iklim-degisikligi-rapor-elma.compressed.pdf Erişim tarihi: 16.02.2023

Keeling, C.D. (1961). The concentration and isotopic abundances of carbondioxide in rural and marine air. Geochim. Cosmochim. *Acta*, 24, 277–298.

Kennedy, C. A., Stewart, I., Facchini, A., Cersosimo, I., Mele, R., Chen, B., ... & Sahin, A. D. (2015). Energy and material flows of megacities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19), 5985-5990.

MFA (2022). UNFCCC and Türkiye's Position. Republic of Türkiye Ministry of Foreign Affairs. https://www.mfa.gov.tr/united-nations-framework-convention-on-climate-change-_unfccc_-and-the-kyoto-protocol.en.mfa Erişim tarihi: 16.02.2023

MGM (1992). Atmosferin Korunması ve İklim Değişikliği. Meteoroloji Genel Müdürlüğü.

MGM (2022a). 2021 Yılı İklim Değerlendirmesi. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/yillikiklim/2021-iklim-raporu.pdf. Erişim tarihi: 16.02.2023

MGM (2022b). 2022 Yılı Performans Programı. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. https://www.mgm.gov.tr/FILES/kurumsal/yatirimfaaliyet/2022-performans-programi.pdf. Erişim tarihi: 16.02.2023

TB (2021). Yeşil Mutabakat Eylem Planı. Ticaret Bakanlığı. https://ticaret.gov.tr/data/60f1200013b876eb28421b23/MUTABAKAT%20YE%C5%9E%C4%B0L.pdf. Erişim tarihi: 16.02.2023

Trenberth, K. E., A. Dai, G. van der Schrier, P. D. Jones, J. Barichivich, K. R. Briffa, & J. Sheffield (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4, 17-22.

UN (1994). United Nations Framework Convention on Climate Change, United Nations. https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf. Erişim tarihi: 16.02.2023

WMO (2022). State of the Global Climate 2021. WMO –No: 1290. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11178.Erişim tarihi: 16.02.2023

## Yazar Hakkında / About Author

**Hikmet EROĞLU | Meteoroloji Genel Müdürlüğü |**
**heroglu[at]mgm.gov.tr | ORCID: 0009-0009-7138-3102**
Hikmet EROĞLU 1989 yılında Türkiye'nin en eski mühendislik okulu olan İstanbul Teknik Üniversitesi'nden meteoroloji mühendisi olarak mezun olmuştur. Sonrasında ülkemizin Hidroloji Enstitüsü olarak kabul edilen Devlet Su İşleri'nde Mühendis ve Müdür olarak 1989 ve 2018 yılları arasında görev yapmıştır. 2018 yılında ise Meteoroloji Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanı olarak atanmıştır. 2020 yılına kadar Araştırma Dairesi Başkanı olarak hizmet verdikten sonra Meteoroloji Genel Müdürlüğü İklim ve Zirai Meteoroloji Dairesi Başkanı olarak atanmıştır.

**Hikmet EROĞLU | Turkish State Meteorological Service |**
**heroglu[at]mgm.gov.tr | ORCID: 0009-0009-7138-3102**
Hikmet EROGLU graduated as a meteorological engineer from our country's oldest engineering school, Istanbul Technical University in 1989. Then, he worked as an engineer and manager at the General Directorate of State Hydraulic Works which is considered as a hydrology institute in our country from 1989 to 2018. In 2018, he was appointed as head of research department of Turkish State Meteorology Service. After serving in this position until 2020, he was appointed as head of climate and agricultural meteorology department.

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ, HİDROMETEOROLOJİK AFETLER VE AFET YÖNETİMİ

# CLIMATE CHANGE, HYDROMETEOROLOGICAL DISASTERS AND DISASTER MANAGEMENT

*Mikdat KADIOĞLU*

DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch04

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ, HİDROMETEOROLOJİK AFETLER VE AFET YÖNETİMİ

***Mikdat KADIOĞLU***
*İstanbul Teknik Üniversitesi*

**Özet**

Küresel iklim değişikliği, her geçen gün hidrometeorolojik afetlerin artan sıklığı, şiddeti ve süresi gibi etkileriyle yaşantımızda daha belirgin hale gelmektedir. Bu durum doğal ve yapay habitatlar ile onların sakinleri üzerindeki riski daha da arttırmaktadır. İklim değişikliğinden etkilenen meteorolojik, iklimsel ve hidrolojik afetlerin neden olduğu zararları minimize etmek için afet risk yönetimi kapsamında, meteoroloji mühendisliği ve iklim değişikliğine uyum çalışmaları, iklim risk yönetimi başlığı altında birleştirilerek etkili bir eylem planı hazırlanmalıdır. Bu durumun vahametini vurgulamak amaçlı olsa da, halihazırda hidrometeorolojik afetlerin yönetimi, tahmini ve erken uyarısı konusunda önemli eksiklikler gözlemlenmektedir. Tüm bu hususlar, ulusal kurum ve kuruluşlar tarafından ele alınsa da, bütünleşik afet yönetimi ve meteoroloji mühendisliği ekosistemde daha doğru bir yer bulmalıdır. Bu bağlamda, bütünleşik afet yönetimi ekosistemi, küresel iklim değişikliği ve hidrometeorolojik afetlerin artan önemi ile birlikte değerlendirilmelidir. Bu çalışmanın amacı, iklim değişikliği, afet yönetimi, hidrolojik ve meteorolojik afetler ile birlikte sürdürülebilir kalkınmanın önemli bir parçası olan sel ve kuraklık gibi hidrometeorolojik afetlerle mücadele etmek için bütünleşik bir yaklaşımın önemini değerlendirmek ve öneriler sunmaktır.

***Anahtar Kelimeler***
*Küresel iklim değişikliği, Hidrometeorolojik afetler, Afet yönetimi, Erken uyarı*

# CLIMATE CHANGE, HYDROMETEOROLOGICAL DISASTERS AND DISASTER MANAGEMENT

***Mikdat KADIOĞLU***
*Istanbul Technical University*

**Abstract**

Global climate change is becoming more apparent in our daily lives with the increasing frequency, intensity, and duration of hydro-meteorological disasters. This situation is increasing the risk on natural and artificial habitats and their inhabitants. To minimize the damage caused by meteorological, climatic, and hydrological disasters affected by climate change, an effective action plan should be prepared by combining meteorological engineering and climate adaptation efforts under the title of climate risk management within the scope of disaster risk management. While the severity of this situation is emphasized, there are significant shortcomings in the management, prediction, and early warning of hydro-meteorological disasters. Although these issues are addressed by national institutions, integrated disaster management and meteorological engineering should have a more accurate place in the ecosystem. In this context, the integrated disaster management ecosystem should be evaluated together with the increasing importance of global climate change and hydro-meteorological disasters. The aim of this study is to evaluate the importance of an integrated approach to combat hydro-meteorological disasters such as floods and droughts, which are important parts of sustainable development, together with climate change, disaster management, hydrological and meteorological disasters, and to provide recommendations.

***Keywords***
*Global climate change, Hydrometeorological disasters, Disaster management, Early warning*

## 1. Giriş

Doğa olayları, dünya genelinde yaşamı önemli ölçüde etkilediğinde doğa kaynaklı afet olarak adlandırılır. Örnek olarak, kuraklık, çölleşme, deniz seviyesi yükselmesi, çığ ve sel felaketleri, orman yangınları, tarımsal zararlılar gibi hava şartları ile yakından ilişkili afetler gösterilebilir. Yağışlar, şiddetli yerel fırtınalar, tropikal fırtınalar, fırtına kabarmaları, sert kış şartları, kırağı, don vb. ise doğrudan hava şartları tarafından oluşan doğa kaynaklı afetlerdir. Bu afetlerin tamamı meteorolojik afetler ya da meteoroloji karakterli afetler olarak adlandırılır ve meteorolojik şartlar ile doğrudan veya dolaylı olarak ilişkilidir. Sel ve kuraklık ise hidrometeorolojik afetler olarak adlandırılır (Kadıoğlu, 2012).

Dünya genelindeki doğa kaynaklı afetler ele alınınca, 31 çeşit doğa kaynaklı afetin 28 tanesini meteorolojik afetlerin oluşturduğu görülür (Bryant, 2005). Doğa kaynaklı afetlerin çeşitleri ve önem sıraları ülkeden ülkeye de değişmektedir. Örneğin, Akdeniz Bölgesi'ndeki doğa kaynaklı afetler kuraklık, seller, orman yangınları, heyelan, dolu fırtınaları, çığlar, donlardır. Ülkemizde en sık görülen meteoroloji karakterli afetler ise dolu, sel, taşkın, don, orman yangınları, kuraklık, şiddetli yağış, hortum, yıldırım, çığ, kar ve fırtınalardır. Dünya Meteoroloji Örgütü'ne (WMO) ve UNISDR'a göre sadece 1980'li yıllarda dünyada 700,000 kişi meteorolojik afetlerde hayatını kaybetmiştir ve 1995 yılından itibaren meteorolojik afetlerden etkilenen insan sayısı 4 milyarı aşmıştır (UNISDR, 2016).

Son yıllarda, hidrometeorolojik afetler özellikle artan bir şiddet ve sıklıkla meydana gelmektedir. Günümüzde insan aktiviteleri, sanayileşme, yanlış yerleşim seçimleri, doğanın tahrip edilmesi gibi faktörler, bu tür afetlerin etkilerini arttırabilir veya yeni afetlerin ortaya çıkmasına neden olabilir. Küresel iklim değişikliği ve çarpık kentleşme gibi nedenlerden dolayı, önümüzdeki yıllarda hidrometeorolojik afetlerde ve kentsel yerleşimlerimizde riskleri arttıran tali tehlikelerde önemli bir artış beklenmektedir (Kadıoğlu, 2012).

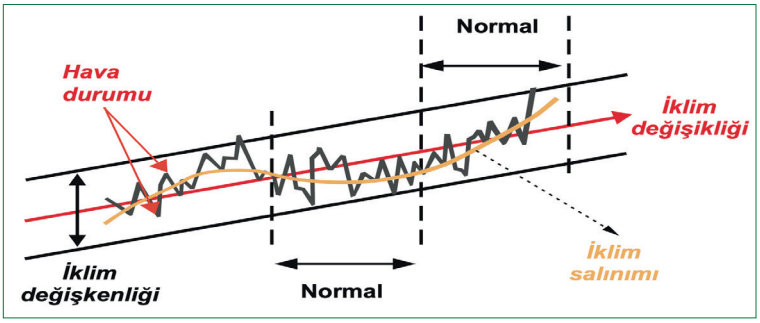
Bu sebeple, ülkemizde hava, su ve iklim konuları, afetlere karşı gözlem, tahmin ve erken uyarı hizmetlerinin etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi için iklim risk yönetimi temelinde bir araya getirilmeli ve bu hizmetler bütünleşik ve bilimsel afet yönetimi ışığında yeniden yapılandırılmalıdır (IPCC, 2012). Bu ihtiyaca cevap vermek için, bu çalışmada afet yönetimi sisteminde erken uyarıya daha fazla önem verilerek, hidrometeorolojik afetlerden iki tanesi kısaca ele alınmıştır.

## 2. Küresel İklim Değişimi ve Türkiye

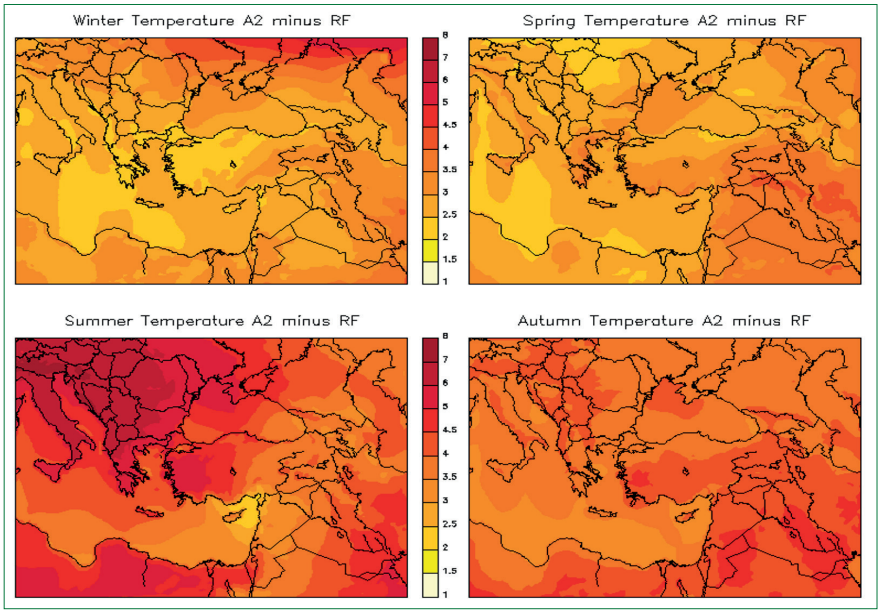
İnsan faaliyetleri son yüz yıl içinde karada ve suda yapılan tahribatın bir sonucu olarak, toprağın, suyun ve hava bileşiminin önemli ölçüde bozulmasına neden oldu. Artık hızla artan sanayi ve yerleşim bölgelerinden çıkan sera gazları, çevre ve atmosferin büyük ölçüde kirlenmesine yol açarak, küresel ölçekte havanın ısınma eğilimini artırdı. Sonuç olarak, insanlar artık iklimin etkisi altında ve iklim de insanları etkiliyor. Bu durum, insanlığın 3. bin yılında küresel iklim değişimi sorunuyla karşı karşıya kalmasına neden olmuştur (IPCC 1991a,b; IPCC 2001a,b; IPCC 2007; IPCC, 2012).

Ancak, Türkiye'de iklim ve meteorolojik konularda bilgi düzeyi çok düşük olduğundan hava durumu, iklim vb. terimler ve kavramlar sıklıkla birbirine karıştırılmakta ve yanlış kullanılmaktadır. Bu nedenle, Şekil 1'de temel kavramlar şematik olarak gösterilmiştir.

Başka bir ifadeyle, son yaklaşık 150 yıldır petrol, kömür, doğal gaz gibi fosil yakıtların aşırı tüketimi ve arazi örtüsündeki değişimler nedeniyle, atmosfere büyük miktarda zararlı gaz ve parçacıklar salınmaktadır. Bu salınım sonucu, atmosferde ozon (O3)'ü seyrelten kloroflorokarbon (CFC) gazları ve karbondioksit (CO2), metan (CH4), diazot monoksit (N2O) gibi sera gazlarının miktarları önemli ölçüde artmıştır. Bu artışlar, sera etkisinin güçlenmesine ve günümüzdeki küresel iklim değişimi ve küresel ısınma sorununun ortaya çıkmasına neden olmuştur (IPCC 1991a,b; Kadıoğlu, 2007, 2020).



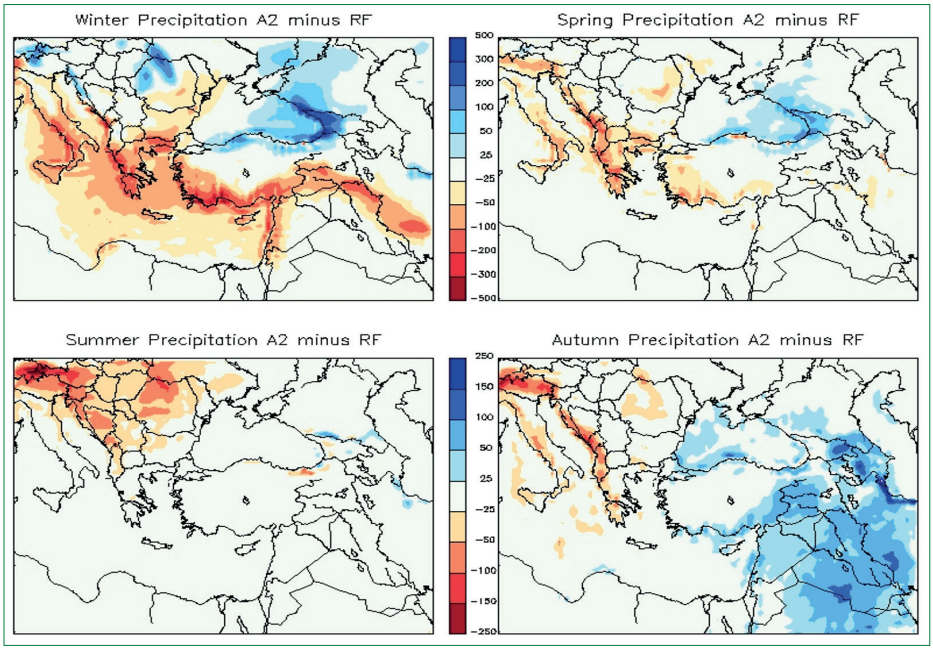

***Şekil 1.*** *Hava ve iklim ile ilgili hava durumu, (mevsim) normali, ikim değişkenliği, iklim salınımı ve iklim değişikliği kavramlarının şematik gösterimi (Kadıoğlu, 2020).*




***Şekil 2.*** *2100 yılında hava sıcaklıklarında beklenen değişimlerin yersel ve mevsimsel dağılımı 2071-2100 yılları ortalamasının 1961-2000 yılları ortalamasından olabilecek farklar şeklinde gösterilmektedir (Önol, 2007).*

Türkiye genelinde yıllık ortalama sıcaklık artışı 2.5-4°C arasında değişmektedir. Özellikle Ege Bölgesi ve Doğu Anadolu'nun önemli bir kısmında bu artış 4°C'ye kadar ulaşmaktadır (Şekil 2). Ege ve Akdeniz Bölgeleri'ndeki yıllık ortalama sıcaklık artışının temel nedeni, yaz aylarında Avrupa kaynaklı sıcak hava dalgasının bu bölgeleri de etkilemesidir. Bu nedenle, Ege, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri'nde yaz aylarında hava sıcaklığındaki artış 7°C'ye kadar olabilir (Onol ve Semazzı, 2009). Ortalama sıcaklıkta bu kadar yüksek bir artışın orman yangınlarından hayvan ve bitki çeşitliliğine, insan sağlığına kadar birçok alanda etkisi olacağı açıktır. Ayrıca sıcaklık artışı, mevsim geçişlerini etkileyecek, yaz mevsimi ilkbahar ve sonbahar aylarını da içine alacak şekilde genişleyecek, su ve gıda stresi daha da artacaktır.

Kış aylarında özellikle Türkiye'nin güney bölgesi olan Ege, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu'da %20 ila %50 arasında yağış azalması yaşanması beklenmektedir (Şekil 3). Bu durum, söz konusu bölgelerin su havzalarının ciddi tehlike altında olduğunu göstermektedir. Karadeniz bölgesinde ise yağış artışı beklenmektedir, ancak bu oranda değildir (Onol ve Semazzı, 2009). Rüzgâr paternlerindeki değişiklikler, nem girişini yavaşlatarak güney bölgelerimizde yağışı azaltacaktır. Yağış değişikliklerinin belirgin olduğu sonbahar mevsiminde ise Güneydoğu ve Doğu Anadolu'nun bir kısmında %50'yi aşan artışlar beklenmektedir. Ancak bu bölgedeki sonbahar yağış artışının tek başına değerlendirilmesi yanıltıcı olabilir çünkü kış mevsiminden kalan yağış bütçesindeki açık ve gelecekteki sıcaklık artışıyla birlikte artacak buharlaşma da hesaba katılmalıdır. Bu nedenle, ülkemizin su-enerji politikaları açısından önemli olan yukarı ve orta Fırat-Dicle havzası için de durum pek olumlu görünmemektedir.



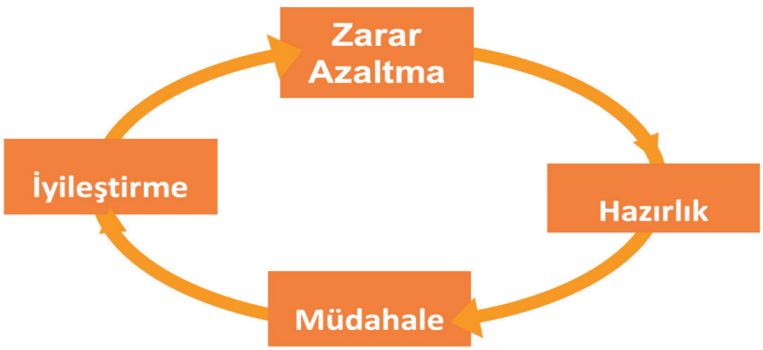

***Şekil 3.*** *2100 yılında yağışlarda beklenen değişimlerin yersel ve mevsimsel dağılımı 2071-2100 yılları ortalamasının 1961-2000 yılları ortalamasından olabilecek farklar şeklinde gösterilmektedir (Önol, 2007).*

Yiyecek, içecek ve su eksikliği durumunda diğer tüm sosyo-ekonomik kaygılar anlamsız hale gelir. Bu nedenle, sürdürülebilir kalkınma hedefi, "gelecek nesillerin ihtiyaçlarını karşılamak için bugünün ihtiyaçlarını karşılama, sosyal maliyetleri de dikkate alarak zamanında önlemler alınması ve uyum çalışmalarının yapılması" şeklinde belirlenmelidir. Bu bakış açısıyla, hükümetlerin acilen ele alması gereken konular arasında kuraklık risk yönetiminin geliştirilmesi, su ve çevre kirliliğinin önlenmesi ve tarım alanları dahil olmak üzere tüm doğal kaynakların korunması yer almaktadır.

## 3. Afet Yönetimi Sistemi

Öncelikle Bilimsel ve Bütünleşik Afet ve Acil Durum Yönetimi, her türlü tehlikeye karşı hazırlıklı olmayı, zararları azaltmayı, müdahale etmeyi ve iyileştirmeyi amaçlayan bir süreci ifade eder. Bu süreç, mevcut kaynakların organize edilmesi, analiz, planlama, karar alma ve değerlendirme süreçlerinin tümünü kapsar (Kadıoğlu, 2013).

Bilimsel ve bütünleşik afet yönetim sistemi ilkelerine uygun olarak, ülkemizdeki afetlerle ilgili yeniden yapılanmada sadece deprem tehlikesine odaklanmak yerine, mutlaka tüm afetlerin ele alınması gerekmektedir.




***Şekil 4.*** *Afet yönetim sisteminin dört evre ile şematik bir gösterimi (Kadıoğlu, 2013).*

Çünkü kuraklık, sel, kar fırtınaları ve çığlar gibi birçok hidrometeorolojik afet, gelişmiş ülkelere nazaran ülkemizde daha fazla insan ve ekonomik kayba neden olmaktadır. Bu nedenle artık yaşanan maddi ve manevi kayıplar, her toplumun ve her kurumun bu afetlerle mücadele etmek için daha fazla önlem alması ve kayıp azaltma çalışmalarına daha çok önem vermesini gerektirmektedir.

Ülkemizde, yapılan afet çalışmalarının incelenmesiyle, çabalarımızın büyük bir kısmının afetlerden sonraki "müdahale etme" aşamasına odaklandığı görülmektedir. Ancak "Afet Yönetimi" sadece insanları enkaz altından kurtarmak, yangınları söndürmek veya sel sularından tahliye etmek gibi müdahale çalışmalarından ibaret değildir. Modern afet yönetiminin önceliği, insanları olası tehlikelerden korumak ve mevcut riskleri afetler olmadan çok önce azaltmaya yöneliktir (Sözen ve Piroğlu, 1999; Kadıoğlu ve Özdamar, 2008). Bu şekilde müdahale çalışmalarına olan ihtiyacı minimize edebiliriz.

Türkiye'deki afet yönetiminde, afetlere/acil durumlara hazırlık ve olası zarar/risklerinin azaltılmasına yönelik risk yönetimi; afetler/acil durumlardan sonra müdahale etme ve iyileştirme çalışmalarına ise kriz yönetimi denir (Kadıoğlu, 2013). Bu nedenle, öncelikle hidrometeorolojik tehlikelerin göz önüne alınması ve zarar azaltma çalışmaları başta olmak üzere, afet yönetiminin en az dört aşamasına yönelik çalışmalar yapılmalıdır. Bu çalışmalara herkesin katılımı ve tüm kaynakların kullanımı hedeflenmelidir (Şekil 4). Bu nedenle, bu bölümde sadece hidrometeorolojik afetlerin risk yönetimi ana hatları ele alınmaktadır.

## 4. Zarar/Kayıp Azaltma

Hidrometeorolojik tehlikeler ve bu tehlikelerin etkilerinden kaynaklanacak can ve mal kaybı zararlarını azaltmak veya ortadan kaldırmak için yapılan sürekli çalışmalar, zarar azaltma aşamasında yer alır (Kadıoğlu, 2013). Bu nedenle, afet ve acil durum planının yürürlüğe girmeden önce veya sonra oluşturulabilir. Bu çalışmalar, büyük tehlike içeren alanların bölgeleme, yapılaşma ve imar yönetmeliklerini belirlemek, sel ve diğer tehlikeli durumlarla ilgili verileri toplamak ve uygun yerleşim bölgelerini belirlemek, acil durumlarda barınakların açılması veya afet sonrası geçici barınma birimlerinin konumlandırılması gibi konuları içerir. Zarar azaltma aynı zamanda, işyerlerinde çalışan kişileri ve halkı önlemler konusunda eğitmek, böylece kayıp ve yaralanmaları azaltmayı amaçlar.

Ekonomik kayıpları azaltmak için alınacak önlemler, uzun vadede afetlerin yarattığı zararları azaltmak için oldukça önemlidir. Ancak, zarar azaltma çalışmaları sadece afet sonrasında değil, tehlikeli bölgelerde kuraklık, sel, fırtına veya depremler gibi doğa kaynaklı afetlerin ardından yeniden yapılanma sürecinde de uygulanabilir. Bu nedenle, bir acil durum ya da afet sonrasında duyarlılığın artmasıyla birlikte daha güvenli yerleşim birimleri oluşturmak daha kolay olabilir. Bunun için, önceden zarar azaltma planları hazırlanmalı ve uygulanmalıdır.

## 5. Hazırlık

Hidrometeorolojik tehlikelere karşı hazırlıklı olmak, zararları en aza indirmek, müdahale etmek ve hayatı normalleştirmek için etkili bir afet ve acil durum yönetimi, planlama, eğitim ve tatbikatlar gerektirir.

Sel gibi afet veya acil durumlar genellikle aniden ortaya çıktığından, o an etkin bir çözüm bulmak zordur. İdari birimler, ancak daha önceden hazırlanmış önlemlerle, acil durum yönetimi sorumluluklarını yerine getirebilir. Koruyucu planlama ve hazırlık, sorun ortaya çıkmadan önce yapılmalıdır; bu süreç "hazırlıklı olma" olarak tanımlanır (Kadıoğlu, 2013).

Hazırlıklı olma, acil durum veya afet durumunda yetki ve sorumlulukların belirlenmesi ve destek kaynaklarının düzenlenmesini içermektedir. Tüm yönetimler, acil durum veya afet yönetimi için görevliler belirlemeli ve bu görevleri yerine getirmek için gerekli olan personel, donanım ve diğer kaynakları da tanımlamalıdır. Ekipman ve donanımların bakımı, tahmin ve erken uyarı sistemlerinin kullanımı, personelin eğitimi ve diğer aktiviteler sürekli olarak güncellenmeli ve tekrarlanmalıdır.

Hazırlıklı olma önlemleri tek seferlik düşünülmeyip sürekli bir şekilde devam ettirilmelidir. Hazırlıklı olma çalışmalarında temel öğe, idari birimin farklı afet ve acil durum yönetimi yükümlülüklerini bağlayan planların oluşturulmasıdır.

## 6. Tahmin ve Erken Uyarı

Gelişmiş ülkelerde meteorolojik afetlerin önceden tahmin edilerek erken uyarılarının yapılabilmesi, diğer afetlerden farklı kılan en önemli özelliktir. Bu sayede meteorolojik tahmin ve erken uyarı sistemleri, can kayıplarında önemli azalmalar ve ekonomik zararlarda kısmen düşüşler sağlamıştır.

Örneğin, gelişmiş ülkelerde doğru arazi kullanım politikaları, hidrometeorolojik gözlem ağları, meteoroloji radarı, otomatik akım ve yağış istasyonları ve hidrometeorolojik modeller ile doğru ve erken nehir/göl/deniz su seviye tahminleri ve uyarıları ile can ve mal kayıpları en aza indirgenebilmiştir. Ancak, Türkiye'de henüz halkı doğru ve zamanında uyaracak bir kurum veya kuruluş bulunmamaktadır. Hava şartları, iklim ve su seviyeleri gibi önemli faktörler takip edilerek "sel", "çığ" ve "kuraklık" gibi olaylar için halkın hazırlıklı olması için zamanında uyarılar yapılacak tek bir sistem henüz kurulamamıştır.

Bu nedenle, Türkiye'de meteorolojik afetlere karşı yeterli bir hazırlık yapılmaması, büyük şehirlerde normal hava şartlarında bile zorlukla yürütülen sosyo-ekonomik faaliyetlerin, şiddetli hava şartlarında büyük ölçüde aksamasına neden olmaktadır. Halkın önceden gerçek ve doğru bir şekilde uyarılamaması ve yetkililerin bilgilendirilememesi nedeniyle, normale dönüşler kısa bir süre içinde az bir kayıpla mümkün olamamaktadır.

## 7. Erken Uyarı Sistemi

Erken uyarı sistemleri, örneğin taşkın riskinin tespiti, riskin gelişimini izleme, ilgililere ve halka zamanında uyarı yapılması ve tahliye için harekete geçilmesi gibi müdahaleleri içerir (Kadıoğlu, 2013). Erken uyarının amacı, tehlikeli şartlarda mümkün olduğu kadar çok sayıda insanın gerekli önlemleri zamanında alarak, yaralanma, ölüm ve ekonomik kayıpları en aza indirmektir. Dünya genelinde, özellikle ani taşkınlara maruz kalan alanlarda meydana gelebilecek hasarların azaltılması için, ilgili kurum ve kuruluşların bölgesel kapasitelerini artırması, gerçek zamanlı ve doğruluğu yüksek Ani Taşkın Uyarıları yapmak için doğru yapılanmış Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemleri geliştirmesi gerekmektedir.

UNISDR, erken uyarıyı "afet riskini engelleme, riskleri azaltma veya afetlere daha etkin müdahaleye imkan sağlayacak bilgilerin yetkili kurumlar tarafından zamanında ve etkin olarak duyurulması" olarak tanımlamaktadır.

Türkiye'de ise, bu kavram yerine "meteorolojik uyarı" terimi daha yaygın kullanılmaktadır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM)'ne göre meteorolojik uyarı, "beklenen, gelişen, devam eden, uydu görüntülerinde veya radar ekranında görülen kuvvetli hava olayları hakkında yer ve zaman belirterek hazırlanan özel hava raporlarıdır." Son yıllarda, Devlet Su İşleri (DSİ) de sel zararlarını azaltmak ve kontrol altına almak için yeni bir yaklaşım benimsemiştir, çünkü sel felaketleri can kayıplarının yanı sıra büyük ekonomik kayıplara neden olmuştur.

Sonuç olarak, afet yönetiminin önemli bir parçası, yerel ve bölgesel ölçekte afet zararlarının azaltılmasında hayati öneme sahip olan Taşkından Koruma Yapıları ve Erken Uyarı Sistemleridir. Örneğin, ABD'de Otomatik Yerel Gerçek Zamanlı Sistem (ALERT) adı verilen kapsamlı bir Taşkın Uyarı Sistemi mevcuttur. Bu sistem, gerçek zamanlı yağış ve akış ölçerlerden gelen verileri toplayan ve işleyen bir merkez istasyonundan oluşur. Geniş bir ölçüm istasyonu ve sensör ağı, yağış yoğunluğu, akış, baraj seviyeleri, rüzgar hızı, yönü, sıcaklık, barometrik basınç, bağıl nem ve toprak nemi gibi hidrometeorolojik parametreleri ölçer. Önceden tanımlanmış bu parametrelerin herhangi birinde değişiklik olursa, sensörler merkez istasyona bir mesaj gönderir. Veriler, bilgisayar modelleriyle birleştirilerek, potansiyel selin yeri ve zamanı belirlenir. Sel Kontrol Ekibi, halkı bilgilendirmek ve can ve mal kayıplarını azaltmak için Ulusal Meteoroloji Hizmetleri (NWS) ve diğer acil durum hizmetleriyle koordineli çalışır.

Başarılı bir erken uyarı sistemi için aşağıda kısaca açıklanan belli başlı 4 etmen vardır (Şekil 5):




***Şekil 5.*** *Erken uyarı sisteminin belli başlı etmenleri (Kadıoğlu, 2013).*

**1. Risk Tespiti:** Bilindiği gibi risk, tehlike ile zarar görme eğiliminin bir araya gelmesi sonucu ortaya çıkar. Gündelik hava olayları ile değişen taşkın tehlikesinin tahmini, oluşabilecek taşkın afetinin önlenebilmesi ve etkin müdahale için ilk adımdır. Taşkın tahmin sistemleri, örneğin Amerika'da ana akarsu sistemleri için kurulmuştur. Bu sistemler beklenen selin oluşma saati ve şiddeti hakkında gerekli bilgiyi sürekli olarak sağlar. Taşkının yavaş geliştiği ana akarsularda uyarılar olayın birkaç gün ya da hafta öncesinde verilebilir. Daha küçük akarsu kolları için uyarı zamanı birkaç saate kadar düşer ve muhtemelen bir ya da maksimum iki günden fazla değildir. Dik kanal gradyanlı kısa akarsulardaki akışlarda ani taşkın uyarılarının olayın birkaç saat hatta birkaç dakika öncesinde verilmesi mümkündür. Ancak uzun dönem uyarıları gereken bölgeler için daha sıkı ileri planlama ve hazırlık uyarı ve müdahale talepleri kısa aralıklarda da mümkündür.

Örneğin, Japonya'da taşkınlarla mücadele etmek için "Meteorolojik Gözlem ve Uyarı Sistemlerindeki İyileştirmeler" programı yürütülmektedir. Bu program, meteorolojik koşulların tam olarak tahmin edilmesini sağlayarak, tayfunlar, alçak basınçlı alanlar ve cephe faaliyetleri de dahil olmak üzere meteorolojik koşulların tam olarak bilinmesiyle fırtına veya sel hasarını önlemeyi veya azaltmayı amaçlamaktadır.

Japon Meteoroloji Ajansı, ülkenin her yerinde radar, uydu ve gözlem araçları kullanarak meteorolojik gözlemler yapmakta ve bu verileri kullanarak hava tahminleri yapmakta ve uyarılar yayınlamaktadır. Akarsuların su seviyesi ve havzalardaki yağış miktarı ile ilgili bilgi, kapsamlı bir akarsu/havza bilgi sistemi ile sağlanır ve yaygın bir şekilde kullanılır.

Böylece, Japonya'daki meteorolojik gözlem ve uyarı sistemleri sayesinde taşkınların olası etkileri önceden tahmin edilebilir ve gerekli önlemler alınarak zararlar minimize edilebilir.

Ayrıca, Japonya'da "Sel Kontrolü ve Fırtına Çıkmasına Karşı Önlemlerin Teşvik Edilmesi" üzerinde çalışılmaktadır. Bu kapsamda, küçük ve orta ölçekli akarsuların taşması ve şehirlerdeki sel baskınlarının önüne geçmek için Sel Kontrol Kanunu değiştirilmiş ve Temmuz 2001'den itibaren yeni düzenlemeler yapılmıştır.

Değiştirilmiş kanunun amacı, taşkın tahminini genişletmek ve iyileştirmek, su baskınlarının olabileceği yerleri işaret etmek, ilan etmek ve sel uyarılarıyla sel tehlikesi olan yerlerin kolay ve hızlı tahliyesini sağlayacak iletişim sistemlerini hazırlamaktır. Bu sayede, sel kontrolü ve fırtına çıkmasına karşı önlemler alınarak, taşkınların olası etkileri minimize edilmeye çalışılmaktadır.

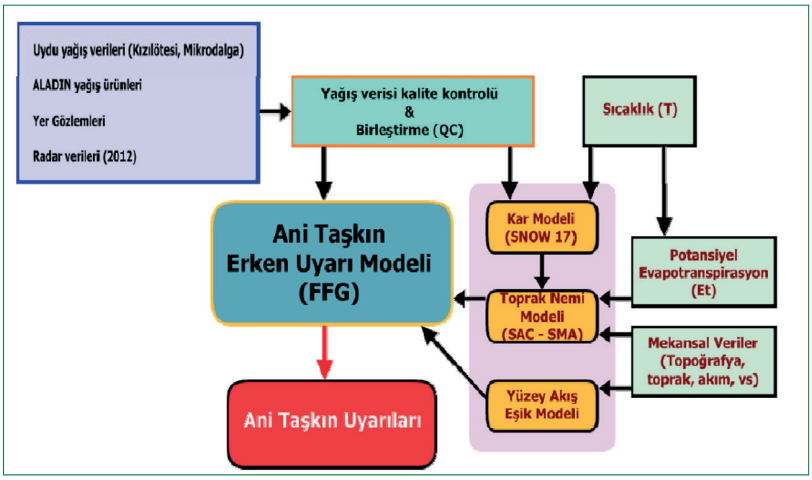
Avrupa ülkelerinin meteoroloji servislerinin katılımıyla EUMETNET tarafından tasarlanan Meteoalarm sistemi, taşkınlar gibi diğer meteorolojik afetler için de kullanılmaktadır. Bu sistem, internet üzerinden Avrupa haritası üzerinde grafiksel bir arayüzle güncel meteorolojik uyarıları halkın kolayca anlayabileceği şekilde sunan bir erken uyarı sistemidir.

Meteoalarm, sağanak yağmur, gök gürültülü fırtına, şiddetli rüzgârlar, sıcak hava dalgaları, orman yangınları, sis, kar yağışı, aşırı soğuk ve beraberindeki tipi, çığ ve şiddetli gel-git olayları gibi muhtemel şiddetli hava olayları ve sonuçlarına karşı kullanıcıları uyarmaktadır. Kullanıcılar, Avrupa haritası üzerinde havanın nerede tehlike arz edebileceğini bir bakışta görebilirler. Web sayfasındaki harita renk kodları, tehlikenin şiddetini ve muhtemel etkisini kullanıcılara aktarmaktadır. Sistemde yer alan ülkeler, haritada mevcut tehlike durumlarını belirten renklerle gösterilir ve kullanıcılar, ülkelerin üzerine tıklayarak ulusal ve bölgesel uyarılara erişim sağlayabilirler. Bu sayede, Meteoalarm sistemi ile taşkın ve diğer meteorolojik afetlerin olası etkileri önceden tahmin edilebilir ve gerekli önlemler alınarak zararlar minimize edilebilir.

Meteoalarm sistemi, en yüksek uyarı durumu olan kırmızı ve turuncu renkleri için bölge üzerine simgeler ekleyerek hangi tipte hava beklendiği ve olası tehlikeyi kullanıcılara bildirir. Bu yüksek seviyeli uyarı hakkında daha detaylı bilgiye ulaşmak için kullanıcılar, bir ülke içindeki bölgeye tıklayabilirler. Detaylı bilgiler, uyarının zaman periyodunu ve şiddetini (örneğin rüzgar şiddeti, yağış miktarı) gösterir. Meteoalarm, kullanıcılara şiddetli hava olayları için içinde bulunulan gün ile bir sonraki günün gösterimi arasında tercih sunar. Ayrıca, sayfa, daha detaylı bilgiye erişim için ilgili ülkenin meteoroloji servisinin web sayfasının bağlantısını da içerir (Staudinger vd., 2007). Bu sayede, kullanıcılar, taşkın gibi muhtemel tehlikeli hava olaylarına karşı gerekli önlemleri almak için güncel ve detaylı bilgilere kolayca erişebilirler.

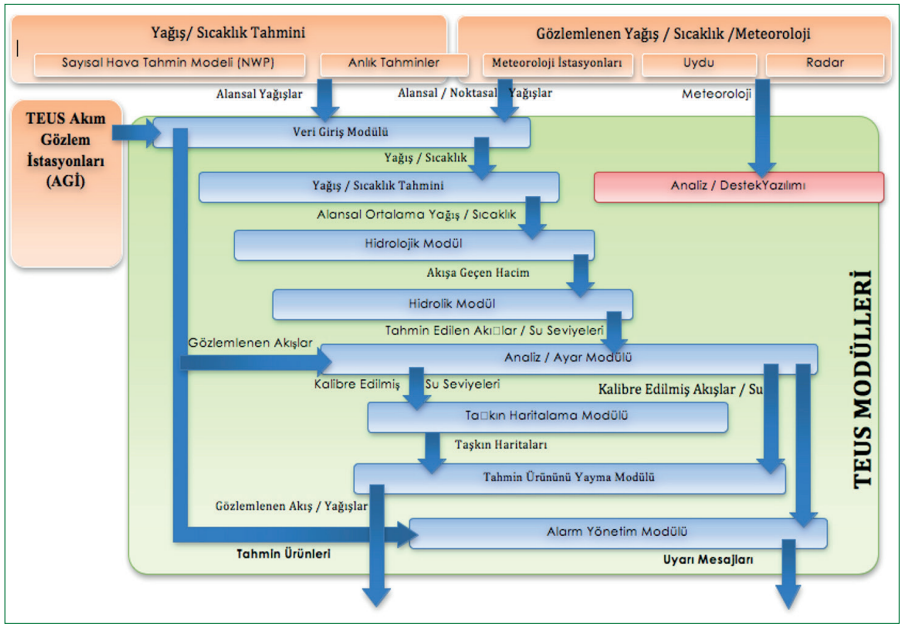
Türkiye, Meteoalarm sisteminin üyesi değildir. Bu sistemde, taşkın eşik değerleri geçmiş yıllarda gözlenen taşkınlar temel alınarak belirlenirken, öncelikle veri setinin teorik bir olasılık yoğunluk fonksiyonuyla temsil edilmesi yaklaşımı kullanılır. Türkiye için MGM tarafından 2900 alt havzaya yönelik ani taşkın tahmin sistemi oluşturulmuştur. Bu sistem, kar modeli (SNOW 17), yüzey akış hesaplamaları için Sacramento toprak nemi modeli (SAC-SMA), banket seviyesi akış miktarını belirlemek için yüzey akış eşik modeli ve ani taşkın erken uyarı ürünlerini üreten ani taşkın erken uyarı modeli olmak üzere dört ana modelden oluşur. Model çıktısı ürünler, kullanımı kolay bir internet ara yüzü ile sadece ilgili kullanıcıların erişimine açıktır.

MGM Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemi'nde yağış verileri olarak uydu, ALADIN vb. model çıktıları, yer gözlemleri ve RADAR ürünleri kullanılmaktadır. Yağış verileri, hata düzeltmeleri ve kalite kontrolünden sonra modellere girdi olarak kullanılır. Modellerde parametrelerin oluşturulması ve kalibrasyonu için CBS ortamında hazırlanmış olan topografya, bitki örtüsü, toprak ve hidrometeorolojik veriler kullanılmıştır. Model konsepti, dağıtılmış bir fiziksel model olup, her bir alt havza için tüm modeller çalışır.




***Şekil 6.*** *MGM ani taşkın uyarı sisteminde kullanılan hidrometeorolojik parametre ve tahmin modellerinin şematik bir gösterimi (SYGM, 2017).*

İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB), şehirdeki 5 dere üzerinde kurulu olan Taşkın Erken Uyarı Sistemi (TEUS) ile, dere yataklarında ve şehir merkezinde yaşayan vatandaşların can ve mal kaybını en aza indirmeyi hedeflemektedir. Bu sistem, 10 adet akım gözlem istasyonu ile birlikte taşkın risk haritaları, yağış tahmin modeli, meteorolojik uydu ve radar verilerini kullanarak çalışmaktadır. TEUS yazılımı gerçek zamanlı verilerin yanı sıra MGM tarafından üretilen ALERO, WRF ve DIS modelleri ile NOAA tarafından üretilen GFS, CMORPH ve QMORPH modellerinin tahminlerini de kullanmaktadır (Şekil 7).




***Şekil 7.*** *İBB AKOM'un ani taşkın uyarı sistemi TEUS'da kullanılan hidrometeorolojik parametre ve tahmin modellerinin şematik bir gösterimi (AKOM, 2014).*

Erken uyarı, öncelikle tahminle başlar. Teknik anlamda, "gelecekte olması muhtemel bir olayın ortaya çıkışının kesin olarak ifade edilmesi ya da istatistiksel olarak bildirilmesi"ne tahmin denir. Başka bir deyişle, hangi konuda olursa olsun, sadece "Kaynak, Yer, Zaman, Miktar ve Olasılık" gibi net ve nicel büyüklükler belirten objektif kestirimlere tahmin denilir (Şekil 8). Bir andaki hava durumundan yararlanarak, atmosferin ilerideki nicel durumunu belirlemeye hava tahmini denir (Kadıoğlu, 2013).

Meteorolojide, erken uyarı toplanan ve işlenen veriler ile üç adımda gerçekleştirilir. İlk adım kısa vadeli hava tahmini yapmaktır. Bu tahmin, 12-24 saat öncesinde şehir ölçeğinde yapılır. Tahminde kaynak, yer, zaman, miktar ve olasılık gibi bilgiler verilir (Şekil 8). İkinci adım takip/gözlemleme veya izlemedir. 2 ila 6 saat öncesinde kasaba, köy gibi küçük yerleşim ölçeğinde, yani noktasal olarak yapılır. Tahminde verilen bilgilere ilaveten, gözlemlenen meteorolojik afetin olası şiddeti ve halkın alması gereken önlemler yer alır.




***Şekil 8.*** *Meteorolojik erken uyarının üç önemli aşaması ve bunların tanımları (Kadıoğlu, 2013).*

Havza bazlı taşkın önleme çalışmaları, barajlar aracılığıyla yağışlı mevsimlerde oluşan yüksek akımların depolanması ve taşkınların pik dönemlerinde kontrollü bir şekilde barajlardan bırakılmasıyla gerçekleştirilir. Bu nedenle taşkın tahmini için belirli parametreler dikkate alınır:

a. Nehir ve derelerdeki su miktarı,

b. Son zamanlardaki yağış miktarı ve gelecek yağış tahminleri,

c. Yağan yağmurun kar erimesine neden olup olmayacağı,

d. Toprağın nemi ve su sızdırma kapasitesi,

DSİ Akım Gözlem İstasyonları (AGİ), taşkın erken uyarı sistemlerinde genellikle başlangıç sınır şartı veya kalibrasyon için kullanılır. Ancak, bütün bir havzada etkili olan yağış istasyonlarından gerçek zamanlı veri toplanarak yağış akış modeline girilmesi ve bu bilgilerin baraj hacimleri ve işletmeleri ile ilişkilendirilmesi gerekmektedir. Bu şekilde elde edilen bilgiler, önce akışa sonra kritik kesitlerde seviyeye ve taşkın uyarı sistemlerinde uyarıya dönüştürülebilir. Yeşilırmak havzasında yapılan hidrolojik modelleme çalışmaları da erken uyarı sisteminin alt yapısı olarak kullanılmaktadır.

**2. İzleme ve Uyarı:** Doğru ve zamanında uyarılar yapabilmek için güvenilir bir tahmin ve erken uyarı sistemi bilimsel bir temele dayandırılmalı ve uzmanlar tarafından oluşturulmalıdır. Tehlike parametreleri sürekli olarak izlenmeli ve acil durumlarda doğru uyarılar yapmak için uyarı mekanizmaları, her afet ve acil duruma özgü olarak belirlenmelidir.

Örneğin, İBB Taşkın Erken Uyarı Sistemi (TEUS) gerçek zamanlı hidrometeorolojik veri depolama ve uyarı gönderme sistemleri ile entegre bir yazılımdır. TEUS, İSKİ ve diğer kurumlarla işbirliği yaparak İstanbul genelinde 5 farklı havza üzerinde çalışmaktadır. Sistem, akarsu akışı ve su seviyesi tahminleri üretmek için birkaç modülden oluşmaktadır. MGM tarafından sağlanan gerçek zamanlı radar ve uydu yağış verileri, AGİ'ler tarafından sağlanan yağış miktarı bilgileri ve çeşitli yağış modeli tahminleri bu modüllerde kullanılmaktadır. Veriler, Veri Giriş Modülü tarafından alınır ve Yağış Miktarı ve Sıcaklık Tahmin Modülüne iletilir. Bu modül, Hidrolojik Modül için sıcaklık ve yağış verilerini sağlar ve pilot havzalardaki akış hacimlerini hesaplar. Hidrolik Modül, pilot havzalardaki kanal ağı akış ve su seviyelerini hesaplar.

Özetle, akarsular üzerindeki AGİ gözlemleri doğru hesaplamalar için gereklidir. Bu gözlemler aşağıdaki sensor ve ekipmanları içermelidir (DSİ, 2004):

• Su seviyesi ölçer sensor (optik)

• Su seviyesi ölçer sensor (manuel-şamandıralı)

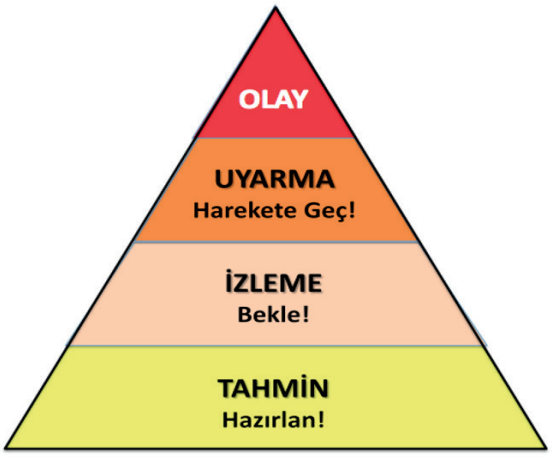
• Yağış miktarı ölçer sensor (ısıtıcılı)

• Debi ölçer (ultrasonik doppler debimetre)

• Seviye gösterir eşel

• Dome kamera

Meteorolojik uyarı ve ihbarlar, gözlemlenen meteorolojik afetin birkaç dakika öncesinden 30-60 dakika öncesine kadar mahalle veya sokak ölçeğinde yapılır (Şekil 8). İhbarların içeriği izleme ile aynıdır, ancak hemen eyleme geçilmesi gerektiğinin altı çizilir (Şekil 9).




***Şekil 9.*** *Hava tahmin epistemolojisindeki tanımları (Kadıoğlu, 2013).*

***Tablo 1.*** *Meteoalarm renk kodları (Staudinger vd., 2007; ERG, 2014).*

| Renk Kodu | Açıklama | Kullanım sıklığı (Alan yaklaşık 300,000 km2) |
|---|---|---|
| **Beyaz** | Eksik, yetersiz, güncel olmayan veya şüpheli veri var. | - |
| **Yeşil** | Herhangi bir uyarı yoktur. | Alışılmış olaylar |
| **Sarı** | Hava koşulları potansiyel olarak tehlikeli olabilir. Bazı hava olayları normalden farklıdır ve dikkatli olunması gereken aktivitelerden etkilenebilirler. Bu nedenle, olası tehlikeler hakkında haberdar olmak için takip etmek önemlidir. | Yılda >30 kez |
| **Turuncu** | Meteorolojik şartlar tehlikelidir. Normal koşullardan farklı olaylar meydana gelmektedir ve bu durum zarar ve can kaybı riskini arttırmaktadır. Dikkatli olunmalı ve beklenen hava koşulları hakkında düzenli olarak bilgi alınmalıdır. Olası risklerin farkında olunmalı ve yetkililer tarafından yapılan uyarılara uyulmalıdır. | Yılda 1 ila 30 kez |
| **Kırmızı** | Hava son derece tehlikelidir. Tahminlere göre son derece şiddetli meteorolojik koşullar yaşanabilir. Bu koşullar hayati tehlike oluşturabilir ve geniş bir alanda hasar ve kazalara neden olabilir. Beklenen meteorolojik koşullar hakkında sık sık bilgi alınmalıdır. Yetkililer tarafından verilen yönlendirmeler kesinlikle takip edilmeli ve her türlü olası duruma karşı hazırlıklı olunmalıdır. | Yılda birden az ve büyük ölçekli olay (5000 km2) |

Halk genellikle taşkın uyarılarıyla ilgili panik yaşamaktansa, sel oluşumunun doğrulanmasından önce tedbirler almada gereğinden yavaş davranır. Ancak özellikle ani taşkınlarda, dere ve nehirlerin aşağı kısımlarındaki halkın uyarılması ve oradan boşaltılması için en fazla bir saatlik süre vardır. Bu nedenle, bu bölgelerde yaşayan insanlar, muhtemel bir sel durumunda bölgeyi en geç bir saat içinde boşaltabilmeleri için hazırlıklı olmalıdır. Bunu sağlamak için, gerektiğinde insanlar sırasıyla "Taşkın İzleme" (izleme alanında veya yakınında taşkın oluşma ihtimali var, uyarıda harekete geçmek için hazır bir şekilde bekle!) ve "Taşkın Uyarısı" (uyarı alanında taşkın şu an oluşuyor veya oluşması an meselesi, derhal harekete geç!) şeklinde çeşitli araçlarla uyarılabilir.

MGM tarafından yapılan meteorolojik erken uyarılar, METEOALARM Erken Uyarı Sistemi'ne entegre edilmek için uyarı şiddet skalaları belirlenmiştir (Staudinger vd., 2007; ERG, 2014). Bu amaçla, örneğin yağış parametresi için eşik değer (mm/24 saat) tespitinde, veri setini temsil eden bir teorik olasılık yoğunluk fonksiyonu belirleme yaklaşımı kullanılmıştır (Tablo 1).

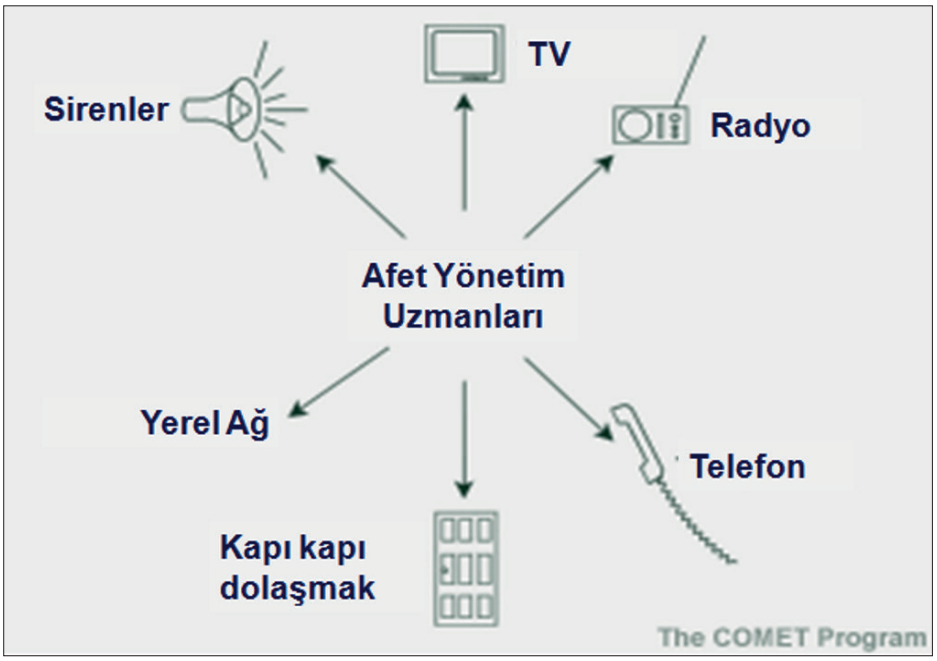
Özetle Erken uyarı sistemlerinin kurulması için gereken ölçüm ağı ve mevcut veriler incelendiğinde, havzada yağıştan sonra başlayan bir taşkın erken uyarı sistemi olup olmadığı ve varsa mevcudiyetinin yeterli olup olmadığına bakılmalıdır. DSİ AGİ'leri sadece kalibrasyon veya özel durumlarda başlangıç sınır şartı bilgisi olarak hizmet verebilir. Havza için uygun taşkın modelleri oluşturmak için, gerçek zamanlı yağış istasyonlarından elde edilen verilerin yağış akış modeline etkin bir şekilde dahil edilerek, akıştan sonra kritik kesitlerde seviyeye ve taşkın uyarı sistemlerinde uyarıya dönüşen bilgiler oluşturulmalıdır. Ayrıca, bu bilgiler baraj hacimleri ve işletmeleri ile ilişkilendirilmelidir. Hidrolojik modelleme çalışmaları, aslında erken uyarı sisteminin temelidir (DSİ, 2004).

Havza Taşkın Yönetim Planı (TYP) çerçevesinde kurulması ve işletilmesi gereken yağış akış modeli, gerçek zamanlı verilerle çalıştırılarak, riskli alanların koşullarına bağlı olarak ayrıntılı bir şekilde kalibre edilmelidir. Bu aşamadan sonra, sonuçlar proje kapsamında geliştirilen hidrolik modellerde değerlendirilerek, debi-seviye-kot bilgileri verilebilen taşkın erken uyarı sistemlerine dönüştürülebilir (SYGM, 2017).

Havzalarda yavaş gelişen ana nehir taşkınları ile küçük ve dik havzalarda ani gelişen taşkınlar görülebilir. Bu alanlarda klasik gerçek zamanlı yağış istasyonlarının verileriyle modelleme yapılabilir. DSİ'nin halihazırda işletmekte olduğu VSAT sistemi ile akım ve yağış istasyonlarına kolaylıkla adapte edilebilen GPRS sistemleri kullanılarak yer istasyonlarının verileri gerçek zamanlı olarak sistemlere iletilmelidir. Havzada büyük baraj çıkışlarını temsil eden akım gözlem istasyonları taşkın başlangıç sınır koşullarını oluşturan noktalar olarak kullanılabileceği gibi, bu barajları da içine alan modelleme sistemleri kurulabilir. Bazı havzalarda son yıllarda denize mansaplanan küçük müstakil dere ve nehirlerde tehlikeli ani taşkınlar gözlemlenmektedir (DSİ, 2004). Bu küçük havzalarda mevcut olan yağış istasyonları bazı durumlarda meydana gelen taşkınları temsil etmekten uzak kalabilir. Denize bakan bu küçük havzalarda, taşkın yapan havzanın yağış ağırlık merkezlerine kurulan gerçek zamanlı yağış istasyonları yanı sıra

radar yağış bilgileri ve meteorolojik taşkın modeli yağış tahminleri taşkın tahmin modellerine entegre edilmelidir. Bu şekilde havzanın ani taşkın yapan küçük alt havzalarında, havza yağışı, üç sistemden gelen yağış bilgileri ile daha doğru olarak hesaplanabilir ve radar ve meteorolojik yağış tahmininden gelecek verilerle taşkın modellemelerinin çalıştırılması erken uyarı için zaman kazandıracaktır.

**3. Yayma ve iletişim:** Halkın uygun şekilde tepki verebilmesi için anlaşılır ve kolayca kavranabilir bir uyarı verilmesi gerekmektedir. Bölgesel, ulusal ve uluslararası iletişim kanalları belirlenmeli ve doğru hedef kitleye ulaştırılmalıdır (Şekil 10). Bu amaçla en azından yerel yetkililer, polis, itfaiye ekibi ve radyo-televizyon istasyonları bilgilendirilmelidir. Bilgiler ayrıca hava durumu sitelerinde de yayınlanmalıdır (Kadıoğlu, 2013; SYGM, 2017).




***Şekil 10.*** *Afetlerde halka yönelik erken uyarı işlemlerinde kullanılabilecek medya araçları ve diğerleri (Kadıoğlu, 2013).*

Erken uyarı, afet riskini engellemek, azaltmak ya da daha etkin müdahaleye olanak sağlayacak bilgilerin yetkili kurumlar tarafından zamanında ve etkin olarak duyurulmasıdır. Meteoroloji istasyonlarımız havzalarındaki taşkınları tahmin edip gerekli uyarıları doğrudan halka yapmalıdır. Bu nedenle ülkemizde kapalı olsa bile uyarı verildiğinde meteorolojik ihbarları veren özel meteoroloji radyolarına ihtiyaç vardır. Ayrıca amatör meteorologlar ve afet gönüllüleri de tehlike bekledikleri durumlarda gelişmeleri tespit edip merkeze bildirmelidir. Yerel yönetimler, sel gözcüleri ve bir eşel yardımıyla sık sık taşan akarsuları takip edebilir ve su seviyesi hızla yükseldiği durumlarda aşağı kısımlardaki insanlar uyarılıp tahliye edilebilir.

Taşkın gözlemlerinin ve uyarılarının etkili olabilmesi için topluma yayılması, uygun zamanlama ve etkili müdahale faaliyetleriyle desteklenmesi gerekmektedir. Bu nedenle yerel yetkililer, polis, itfaiye ekipleri, radyo ve televizyon istasyonları bilgilendirilmelidir. Bilgiler ayrıca hava durumu sitelerinde de yayınlanmalıdır ve uyarılar etkili bir şekilde sunulmalıdır. Taşkına karşı uyarı yapmak için belediye gibi yerlerde kablolu ya da kablosuz hoparlörler kullanılabilir. Kırsal alanlarda ise hoparlörlü araçlar tercih edilebilir. Sivil savunma sirenleri yalnızca savaş durumlarında kullanılması gerektiği için bu konuda eğitimi olmayan halkın taşkın tehlikesini anlaması zordur. Bu nedenle yerel yönetimlerin, sabit ya da mobil hoparlörler kullanarak gerektiğinde halkı uyarmak için hazırlık yapmaları önerilmektedir.

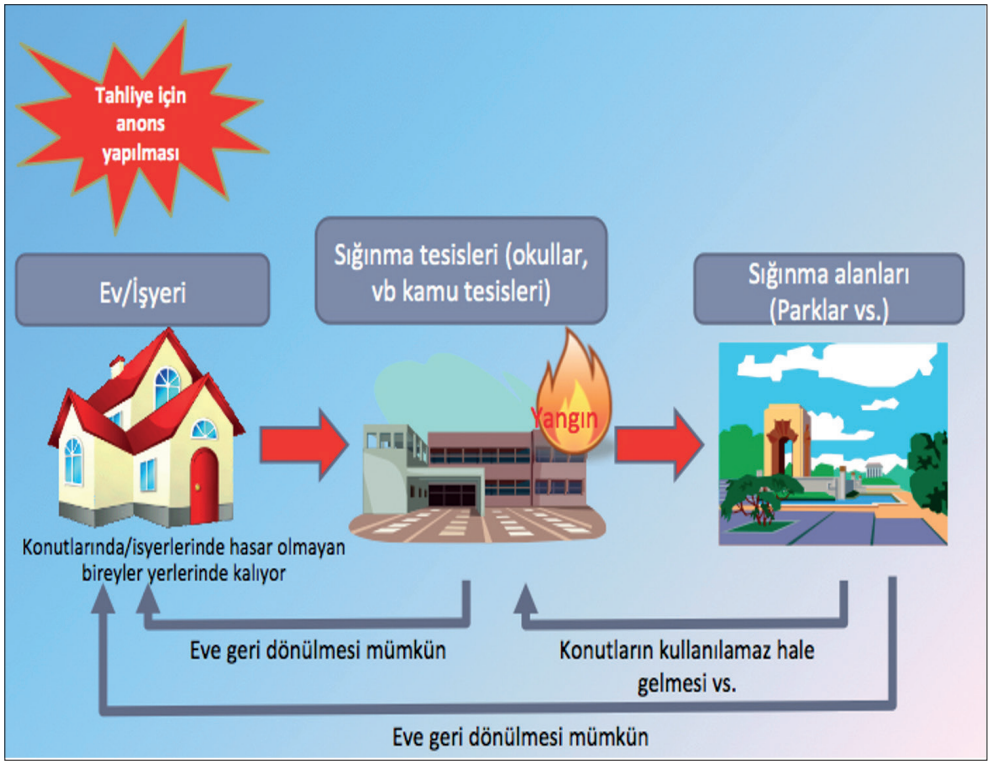
Kısaca, erken uyarı sistemleriyle ilgili başarılı bir iletişim için aşağıdaki 4 kuralın yerine getirilmesi gerekmektedir:

- **Kullanışlı:** Verilen bilgi insanların ihtiyaç duyduğu bilgi olmalıdır.
- **Anlaşılır:** Bilgi toplumun her kesimi tarafından doğru ve anlaşılır şekilde algılanabilmelidir.
- **Dakik:** Bilgi hedef kitleye gerektiği zamanda ulaştırılmalıdır.
- **İnandırıcı:** Yapılan uyarılar toplumun her kesimi tarafından ciddiye alınmalıdır. Aksi halde, erken uyarılara olan güvensizlik "yalancı çoban" sendromuna neden olabilir ve tehlikeli sonuçlar doğurabilir.

**4. Müdahale Kapasitesi:** Toplumların, karşılaştıkları riskleri anlamaları ve nasıl tepki göstereceklerini bilmesi çok önemlidir. Bu nedenle, halkın eğitimi ve yerel yönetimlerin afet hazırlık programları büyük önem taşımaktadır. Tahminlerin ve erken uyarıların yararlı olabilmesi için, tahliye planları ve eğitimleri büyük önem kazanmaktadır.

Birçok durumda yeterli uyarıların yapılması halinde insanlar, hayvanlar ve malların uzaklaştırılması mümkündür, ancak ani taşkınlar sadece insanların tahliyesine olanak sağlayabilir. Tahliyede Şekil 11'deki yol haritası takip edilmeli ve TYP'de yer alan gerekli talimatlara uyulmalıdır (Kadıoğlu, 2013).

Taşkın yönetim planlarında sadece geçici ve kontrollü tahliye ele alınmalıdır. Kalıcı tahliye, afet sonrasında kalıcı konutlara yerleşmek anlamına gelir. Denetimsiz tahliye ise sadece halkın can güvenliği tehlikede olduğunda ve acil müdahale için beklemeye zaman kalmadığında yapılmalıdır.




***Şekil 11.*** *Erken uyarı, tahliye ve geçici barınma ile birlikte eve dönüş çevrimi (Kadıoğlu, 2013).*

## 8. Hidrometeorolojik Afetler

Normal hava koşulları bile, değişken doğasıyla bazen kuraklıklara bazen de sellerin oluşmasına neden olmaktadır. Yarı kurak iklim bölgesinde yer alan ülkemizde, suyun azlığı kuraklık ve fazlalığı sel gibi iki önemli afetin yaşanmasına neden olmaktadır. Bu afetler sosyo-ekonomik yaşantımızı da çok olumsuz şekilde etkileyebilir. Sel ve kuraklık doğa kaynaklı olaylardır ve atmosfer hareketliliği, meteorolojik sistemler ve hidrolojik döngüler içinde bazı bölgelerin zaman zaman ıslak veya kurak periyotlar yaşaması normaldir. Önemli olan ülkemizde sel ve kuraklık gibi afetleri gözlemlemek, önemsemek ve zamanında önlem alabilmektir. (Kadıoğlu, 2018 ve 2019).

Türkiye'de sel tahminleri için gerekli olan yağış ölçümleri Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından, akışa geçen yağış ölçümleri ise Devlet Su İşleri (DSİ) tarafından yapılmaktadır. Bu durum, sel ve kuraklık gözlemlerinin ve uyarılarının gerektiği gibi yapılamamasına ve büyük kaynak israfına neden olmaktadır. Ayrıca, afet ve acil durum yönetimi yapılanmasında birden fazla kurumun sorumlu olması, ancak kimi görev ve sorumluluk alanlarının sahipsiz kalması, sık sık yetki ve sorumluluk karmaşasıyla karşı karşıya kalınmasına yol açmaktadır. Bu sorunlar, afet ve acil durum yönetiminde tüm işlevlerin tek elden ve eşgüdümlü olarak yönetilmesi ile çözülebilir.

## 9. Seller

İnsanlar, Romalılardan beri sellerle mücadele etmek için barajlar ve su bentleri inşa etmiştir. Ancak 1950'lerden sonra, selden korunma kavramı değişmiştir ve artık büyük-küçük her nehire baraj yapılamayacağı anlaşılmıştır. Gelişmiş ülkelerde hidrometeorolojik gözlem ağları, meteoroloji radarları, otomatik akım ve yağış istasyonları ve hidrometeorolojik modeller kullanılarak doğru ve erken nehir su seviyesi tahminleri ve uyarıları yapılmaktadır. Ancak ülkemizde, aşırı yağış, çığ, heyelan gibi doğa kaynaklı afetlere maruz kalma riski artmaktadır çünkü nüfus artmakta, çarpık şehirleşme ve bilinçsiz yerleşimler yaygınlaşmaktadır. Gelişmiş ülkelerde olduğu gibi, ülkemizde de 2-aşamalı ve yerel ani sel ve fırtına ihbarları ve tavsiyeleri "Sel Gözetleme/İzleme" ve "Sel Uyarısı" şeklinde yapılması gerekmektedir. Ancak bu uyarılar yapılamamakta ve tehlike bölgelerinde gerekli tahliye planları ve hazırlıkları yapılamamaktadır.

Sel korunması için ülkemizde yapılacaklar şunlardır: (**1**) Sel yataklarının kontrolsüz yerleşime açılmaması, (**2**) Meteorolojik sel gözetleme ve uyarıları kurallara uygun bir şekilde yaparak halkı bunlara anında uymaları için eğitmek, (**3**) Görünüşe aldanmadan, dibi görülmeyen sel sularına yüzerek, yürüyerek veya otomobil ile girilmemesini sağlamak, (**4**) Yakın bir yerde sel oluşumunun görüldüğü veya duyulduğu an, hemen daha yüksek güvenli yerlere kaçmak gibi halkın sürekli eğitimi ile refleks geliştirmelerini sağlamaktır. Ayrıca, ülkemizde nehir bölgelerine ayrılmalı ve MGM'nin bu bölgelerdeki istasyonları nehirlerin su seviyelerini sürekli olarak tahmin ederek, sel tehlikesini bürokratik işleme gerek duymadan uygun bir şekilde halka duyurabilmelidir.

## 10. Kuraklık

Kuraklık, insanlığın karşılaştığı en büyük doğa kaynaklı afetlerden biri olup en kapsamlı sosyo-ekonomik zararlara neden olmaktadır (Bryant, 2005; Kadıoğlu, 2001 ve 2008). Kuraklık belirtileri, yani azalan yağış miktarı, ilk olarak meteorolojik ölçümlerle tespit edilir. Ardından tarımsal kuraklık ve hidrolojik kuraklık meydana gelir. Kuraklık, içme ve kullanma suyu sıkıntısı, tarımsal verim düşüklüğü ve hidrolojik değişimler nedeniyle sosyo-ekonomik zararlara yol açar. Kuraklıkla mücadele için alınacak önlemler, su talep ve arzlarının dengelenmesini içermelidir. Ancak Türkiye'de ne bir kurum ne de afet mevzuatı, kuraklıkla mücadele için öngörülmüştür. Bu nedenle, su tasarrufu kararları zamanında alınamamakta ve kuraklık sorunu zamanla büyüyebilmektedir. Suni yağmur yağdırma yöntemi de henüz kuraklıkla mücadele için etkili bir çözüm değildir. Bu yöntem dünya genelinde denendi, ancak sonuçlar yetersiz bulunduğundan terk edildi.

## 11. Sonuç ve Öneriler

Doğa kaynaklı 31 afetin 28 adeti meteorolojik şartlar ille ilişkilidir (MMO, 1999). Küresel iklim değişikliği ile birlikte, meteorolojik afetlerin hem sayısı hem de şiddeti artmaktadır (Kadıoğlu, 2012). Türkiye'de, meteoroloji ve hidrometeorolojik olaylar sık sık afetlere dönüşerek, gelişmiş ülkelere kıyasla çok daha fazla insan ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Ancak, halihazırda iklim değişikliği, kalkınma ve afet risk yönetimi alanlarında çalışan uzmanlar farklı kurumsal düzenlemeler, yönelimler, öncelikler ve stratejiler kullanmaktadır. Bu durum, hidrometeorolojik afetlerle mücadelede, farklı kurumların kaynaklarını ve stratejilerini koordine etme yeteneklerinin sınırlı olmasıyla sonuçlanmaktadır. Ulusal ve uluslararası politik ve teknik çerçevelerin farklılığı nedeniyle, afet yönetimi, iklim değişikliği ve sürdürülebilir kalkınma konularında ulusal ve uluslararası koordinasyon eksikliği bulunmaktadır. Bu nedenle, meteorolojik afetlerle mücadele konusunda çalışan kurum ve uzmanların birbirleriyle yeterli derecede sinerji, bilgi ve işbirliği içinde olmadıkları görülmektedir. Bu sorunların üstesinden gelebilmek için, kalkınma, iklim değişikliği ve afet risk yönetimi konularında çalışan kurum ve uzmanların kaynaklarını bütünleştirerek daha etkili bir şekilde kullanmaları gerekmektedir.

Bunun için;

1. İklim değişikliği ile mücadele edebilmek için Afet Risk Yönetimi Stratejisiyle birlikte, tüm politika, plan ve programlar "İklim Risk Yönetimi" adı altında bütünleşik bir şekilde ele alınmalı ve çözümler geliştirilmelidir.

2. Türkiye'de, hidrolojik ve meteorolojik hizmetler bir araya getirilmeli ve hava, su, iklim ve afet hizmetlerinde köklü bir reforma gidilmelidir. Bunun için, havza ölçeğinde toprağın nem durumu, kar örtüsü, fırtınanın etkisi, yağış miktarları vb. belirleyen ve sel veya kuraklık ihbarlarını sürekli olarak yapabilecek şekilde donatılmış tek bir teknik kurum oluşturulmalıdır. Bu kurum, ulusal ekonomiyi kuvvetlendirmek için meteorolojik, hidrolojik ve iklimle ilgili tahminler ve uyarılarda bulunarak can ve mal güvenliğini sağlamalıdır.

3. Afetlerin belirlenmesi, izlenmesi ve gerekli uyarıların yapılabilmesi için, meteorolojik tahminlerde olduğu gibi hava tahminlerinin "Kaynak, Yer, Zaman, Miktar ve Olasılık" şeklinde belirtilmesi ve meteorolojik ihbarların "Kaynak, Tehlike, Yer, Zaman, Büyüklük, Olasılık ve Koruyucu Önlemler" şeklinde tek tek belirtilmesi için gerekli yönetmelikler hazırlanmalıdır.

4. Doğru bir şekilde ihbar yapabilmek için, gözlenen meteorolojik özelliklerin neye işaret ettiği, ancak daha önceki afetlere ait bilgilerin akademik seviyede bilimsel olarak değerlendirilmesiyle mümkündür. Bu nedenle, gerçek anlamda bir kurum-üniversite işbirliği yapılmalı ve bir "Fırtına Veri Tabanı" oluşturulup bilimsel çalışmalarda kullanılacak olan tüm veriler üniversitelere sunularak bilimsel çalışmalar teşvik edilmelidir.

5. Afetlerle mücadele ve afet zararlarını azaltmak için eğitim temel bir unsurdur. Özellikle hazırlık ve zarar azaltma aşamalarında, uluslararası standart mesajlar halka ulaştırılmalıdır. Bu konuda sadece müdahale ekiplerinin değil, hidrometeorolojik afetler öncesinde, sırasında ve sonrasında yapılması gerekenler hakkında halkın sürekli olarak eğitilmesi gerekmektedir. İlk ve orta öğretim ders kitaplarında hidrometeorolojik afetler hakkında doğru ve yeterli bilgiler verilmelidir.

6. Ülkemizde içme ve sulama suyu, sınırı aşan sular, ekolojik göçler, çölleşme, yok olan yaban hayatı, meralar, tarım alanları ve tarımsal üretim, azalan hidroelektrik üretimi gibi büyük problemlerle mücadele edilirken, kuraklık da afet mevzuatına dahil edilmeli ve su, hava ve afet politikaları birlikte ele alınarak, şehir ve bölge ölçeklerinde Kuraklıkla Mücadele Planları geliştirilmeli ve uygulanmalıdır.

7. Son yıllarda yerleşim alanlarındaki yoğunluk ve nüfus artışı nedeniyle, seller sonucu yaşanan zararlar artmıştır. Yerel yöneticilerin doğru kararlar alabilmesi için, o yerin meteorolojisi, hidrolojisi, topografyası, morfolojisi, bitki örtüsü vb. faktörler göz önünde bulundurularak, gelecekte oluşabilecek kent selleri veya taşkınlar için değişik yağış şiddetleri hesaba katılarak, sel yataklarında oluşabilecek yüzeysel su derinlikleri önceden belirlenmelidir.

8. Artık ülkemizde, şehir planlaması, sanayi ve yerleşim bölgelerinin seçimi gibi problemlerin disiplinlerarası çalışmaları gerektirdiği fark edilmelidir. Çevresel Etki Değerlendirme (ÇED) ve Stratejik Çevresel Değerlendirme (SED) raporları için gerekli meteorolojik etütler de uzmanlar tarafından yapılması zorunlu hale getirilmelidir. Bu nedenle afet yöneticileri ve şehir planlamacılarının, bu yeni tehlikelerin şehirlerde yaşayan nüfusu nasıl etkileyebileceği konusunu dikkate almaları gerekmektedir.

9. Ayrıca, şehirlerin imar planları hazırlanırken, sel yatakları hidrometeorolojik analiz ve modeller kullanılarak ayrıntılı bir şekilde belirlenmeli ve buralarda yapılaşmaya kesinlikle izin verilmemelidir.

10. Ülkemizde yayın yapan MGM Meteoroloji Radyosu yerine, MGM Bölge Müdürlüklerine yerleştirilecek basit FM/AM vericileri ile normal radyolardan duyulabilen yerel hava durumu ve fırtına uyarıları halka sürekli olarak ulaştırılmalıdır. Kapalı olsa bile, fırtına anında verilen meteorolojik uyarıları otomatik olarak açılıp yayın yaparak duyuran özel el radyolarının ülkemizde de kullanılması sağlanmalıdır.

11. Özel ve resmi yerel televizyon ve radyoları, olağan dışı hava koşulları sırasında bir merkeze bağlı olarak "Afet Anında Zorunlu Yayın" yapmalıdır. Ayrıca, kablolu ve dijital TV'lerde de örneğin 112 numaralı bir kanal gibi "Afet Anında Zorunlu Yayın" için bir kanal boş bırakılmalıdır. Bu amaçla, RTÜK gibi yasal düzenlemeler yapılmalıdır.

12. Türkiye'de, öncelikle halkın vergi parası korunması göz önünde bulundurularak, çiftçilerin, ev ve iş sahiplerinin hidrometeorolojik afetlere karşı zorunlu ve kategorik sigorta yaptırmaları teşvik edilmelidir. Sigorta yapılmayan hasarlar halkın vergileriyle karşılanmamalıdır.

## 12. Kaynaklar / References


AFAD, (2018). Afete Dirençli Toplum Uygulama Örnekleri. Avrupa Doğal Afetler Eğitim Merkezi (AFEM) *Afete Dirençli Toplum Oluşturmada Yerel Yönetimlerin Rolü Çalıştayı*, Ankara.

AKOM, (2014). *Ayamama Deresi Taşkın Risk Haritası Çalışması*. İBB Afet Koordinasyon Merkezi.

Bryant, E. (2005). *Natural Hazards*. Cambridge University Press, UK. s. 330.

DSİ, (2004). Suya Bağlı Afetlerin Etkilerinin Azaltılmasında Yaşanan Sorunlar ve Çözüm Yolları, *22 Mart 2004 Dünya Su Günü Paneli.*

ERG, (2014). National Weather Service Hazard Simplification Project Social Science Research for Phase I: *Focus Groups Final Report*. Prepared by: Eastern Research Group, Inc. Arlington, Virginia, s. 30.

IPCC Working Group I. (1991a). 'Policy Makers Summary', in Houghton, J. T., G.J. Jenkins, and J.J. Ephraums (editors), *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment,* Cambridge, England: Cambridge University Press: Cambridge, UK.

IPCC Working Group I. (1991b). 'Policy Makers Summary', in Houghton, J. T., G.J. Jenkins, and J.J. Ephraums (editors), *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment,* Cambridge, England: Cambridge University Press: Cambridge, UK.

IPCC, (2001a). The Global Climate of the 21st Century WG I (Science) *Summary for Policy-Makers*, Third Assessment Report. Cambridge University Press: Cambridge, UK.

IPCC, (2001b). Climate Change 2001: Synthesis Report. *A Contribution of Working Groups I, II, III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change;* Watson, R.T., Ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK.

IPCC, (2007). IPCC Fourth Assessment Report Working Group I Report. "*The Physical Science Basis*". Cambridge University Press, New York.

IPCC, (2012). – Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation (SREX).* Cambridge University Press, The Edinburgh Building, Shaftesbury Road, Cambridge CB2 8RU ENGLAND, s.582.

Kadıoğlu M. & N. Topçu, (1997). Marmara Bölgesi'nde Kuraklık Takibi. *Su Kaynaklarının Korunması ve İşletilmesi Sempozyumu*, 2-3 Haziran 1997, İSKİ, İstanbul, s. 167-176.

Kadıoğlu, M & Özdamar, E. (2008). *Afet zararlarını azaltmanın temel ilkeleri* 1. Baskı Ankara: JICA Türkiye Ofisi Yayın No:1, 2005, s. 10.

Kadıoğlu, M. (2007). *99 Sayfada Küresel İklim Değişimi Söyleşi*. Serhan Yedig, Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları.

Kadıoğlu, M. (2008). Kuraklık Kıranı Risk Yönetimi; Kadıoğlu, M. ve Özdamar, E., (editörler), "*Afet Zararlarını Azaltmanın Temel İlkeleri";* s. 277-300, JICA Türkiye Ofisi Yayınları No: 2, Ankara.

Kadıoğlu, M. (2012). *Türkiye'de İklim Değişikliği Risk Yönetimi.* T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, s. 172, ISBN: 978-605-5294-12-0.

Kadıoğlu, M. (2013). *Afet Yönetimi Beklenilmeyeni Beklemek, En Kötüsünü Yönetmek*. TC Marmara Belediyeler Birliği Yayını.

Kadıoğlu, M. (2018). Sellere Dirençli Kent Oluşturmanın Adımları. *Şehir ve Toplum* (10), s. 77-90.

Kadıoğlu, M. (2019). *Kent Selleri Yönetimi ve Kontrol Rehberi.* Marmara Birliği Kültür Yayınları, s. 366. İstanbul.

Kadıoğlu, M. (2020). *Bildiğiniz Havaların Sonu: Küresel İklim Değişimi ve Türkiye*, s. 272, SİA Kitap, İstanbul.

Kadıoğlu, M. (Editör), (2001). *Kuraklık Kırarı*. Güncel Yayıncılık, İstanbul, 128.s.

MMO, (1999). *Meteorolojik Karakterli Doğal Afetler ve Meteorolojik Önlemeler Raporu*, TMMOB Meteoroloji Mühendisleri Odası. 61 s.

Önol, B. (2007). *Downscaling climate change scenarios using regional climate model over Eastern Mediterranean*. İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haziran 2007, p: 87.

Onol, B. & Semazzı, F. H. M. (2009). Regionalization of Climate Change Simulations over the Doğu Akdeniz. *Journal of Climate,* 22, 1944-1961.

Seval, S. & Piroğlu, F. (1999). *Acil Durum Yöneticileri için Zarar Azaltma Yöntemleri,* İTÜ Afet Yönetim Merkezi Yayınları, İTÜ Press.

Staudinger, M., Niedermoser B., Ungersböck M., & Ohms A. (2007). *European meteorological warnings with the EUMETNET - METEOALARM system*, 11th Workshop on Meteorological Operational Systems, 13 November 2007.

SYGM, (2017). *Taşkın Yönetimi.* T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müd., Ankara.

## Yazar Hakkında / About Author

**Prof. Dr. Mikdat KADIOĞLU | İstanbul Teknik Üniversitesi |**
**kadioglu[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0002-4786-6050**

Meteoroloji ve Afet Yönetimi Profesörü Mikdat Kadıoğlu, lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Meteoroloji Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamış, Atmosfer Bilimleri konusunda 1987'de Master ve 1991'de Doktorasını ABD'nin Missouri-Columbia Üniversitesinden almıştır. Afet Yönetimi konusunda ABD'de FEMA, Japonya'da JICA ve İngiltere'nin Bournemouth Üniversitesinin eğitimlerine katılmış. Atmosfer Bilimleri ve Afet Yönetimi konusunda bilimsel makale, bildiri, rapor ve kitaplar şeklinde yayınları var. İstanbul Büyük Şehir Belediyesi Afet Koordinasyon Merkezi, İstanbul Büyük Şehir Belediyesi Başkanı ve Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı danışmalığını yapmış. Sivil Savunma ve KIZILAY Eğitim Gönüllüsüdür. TV'lerde belgeseller hazırlayıp sunmuştur. Hürriyet ve Milliyet Gazetelerinde yazarlığı yapmıştır. Şu an İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Meteoroloji Mühendisliği Bölümü Bölüm Başkanı, İTÜ İklim Değişikliği Uygulama ve Araştırma Merkezi Müdürü ve İTÜ Afet Yönetimi Enstitüsü Müdürü, Türk Kızılayı Derneği Genel Başkan ve TÜBİTAK MAM Başkan Danışmanıdır.

**Prof. Dr. Mikda KADIOĞLU | Istanbul Technical University |**
**kadioglu[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0002-4786-6050**

As a Professor of Meteorology and Disaster Management Mr. Mikdat Kadıoğlu completed his undergraduate education at Istanbul Technical University, Faculty of Aeronautics and Astronautics, Department of Meteorological Engineering, and received his Master's Degree in Atmospheric Sciences in 1987 and PhD in 1991 from Missouri-Columbia University, USA. He has attended the trainings of FEMA in the USA, JICA in Japan and Bournemouth University in the UK on Disaster Management. He has publications in the form of scientific articles, papers, reports and books on Atmospheric Sciences and Disaster Management. He worked as an advisor to the Istanbul Metropolitan Municipality Disaster Coordination Center, the Mayor of Istanbul Metropolitan Municipality and the Prime Ministry Disaster and Emergency Management Presidency. He is a Civil Defense and KIZILAY Education Volunteer. He has prepared and presented documentaries on TV. He worked as a writer for Hürriyet and Milliyet Newspapers. He is currently the Head of the Department of Meteorological Engineering at Istanbul Technical University (ITU) Faculty of Aeronautics and Astronautics, the Director of ITU Climate Change Application and Research Center and the Director of ITU Disaster Management Institute, the Advisor to the President of the Turkish Red Crescent Society and the President of TÜBİTAK MAM.

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SÜRECİNDE HİDROMETEOROLOJİK AFETLER VE TAHMİN SİSTEMİ

## HYDROMETEOROLOGICAL DISASTERS AND FORECAST SYSTEM IN THE PROCESS OF CLIMATE CHANGE

*Hakan DOĞAN*

DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch05

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SÜRECİNDE HİDROMETEOROLOJİK AFETLER VE TAHMİN SİSTEMİ

***Hakan DOĞAN***
*Meteoroloji Genel Müdürlüğü*

**Özet**

Küresel iklim değişikliğinin etkisiyle, aşırı hava ve iklim olaylarının sıklığı, şiddeti ve coğrafi dağılımında değişiklikler olmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC)`nin Değerlendirme Raporlarına göre, aşırı hava ve iklim olaylarındaki bu değişikliklerin kuvvetlenerek devam edeceği öngörülmektedir. Buna bağlı olarak, doğa kaynaklı bu tehlikelerin yol açtığı afetlerde de artışlar olacağı beklenmektedir. Doğa kaynaklı afetler denildiğinde, ilk akla gelen depremler olmasına rağmen, şiddetli ve aşırı meteorolojik olaylara bağlı olarak meydana gelen afetler doğa kaynaklı afetlerin büyük bir bölümünü oluşturmaktadır. Farklı iklim bölgelerine sahip olan ülkemizde de son dönemde yaşanan küresel değişimlere bağlı olarak meteorolojik karakterli ve doğa kaynaklı afetlerin daha sık meydana geldiği, can ve mal kayıplarına neden olduğu bilinmektedir. Ülkemizde yaşanan meteorolojik afetlerin sayılarında ve şiddetinde 2000'li yıllardan itibaren belirgin artış olduğu görülmektedir. Yanlış arazi kullanımı ve yerleşim uygulamaları ile bölgesel ve yerel faktörlerin etkisinin yanı sıra iklim ve hava olaylarından kaynaklanan risklere karşı yeterli hazırlıkların yapılmaması şiddetli ve çok şiddetli meteorolojik hadiselerin birer afete dönüşmesine neden olmaktadır. Yaşanan meteorolojik afetler ve sonuçları, tahmin ve erken uyarıların dikkate alınmasının, şiddetli ve aşırı hava olaylarının birer afete dönüşmeden ya da dönüşse bile olabilecek en az zararla atlatılabilmesi için hazır olunmasının ve zamanında doğru önlemler alınmasının önemini ortaya koymaktadır. Atmosferik olayların tahmin edilebilmesinde teknolojik gelişmelerin artması ile yüksek kapasiteli bilgisayarların kullanımının yaygınlaşması pek çok kolaylığı da beraberinde getirmiştir. Hazırlanan sayısal hava tahmin modelleri ile saatlik, günlük ve haftalık ölçeklerde atmosferde meydana gelebilecek değişimler tahmin edilebilmektedir. Tahminlerin elde edilmesi kadar üretilen erken uyarı ürünlerinin kamuoyu tarafından anlaşılabilir olması da afet tehlikelerinin azaltılması açısından oldukça önemlidir. Bir tahmin ve erken uyarı kuruluşu olan Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) hazırlamış olduğu meteorolojik tahmin ve erken uyarıları tüm kamuoyu ve ilgili kamu kurum/kuruluşlarının bilgisine sunmakta olup afet risk azaltımı zincirinin ilk parçası olarak çalışmalarını sürdürmektedir.

***Anahtar Kelimeler***
*İklim, İklim değişikliği, Meteorolojik afetler, Tahmin, Erken uyarı*

# HYDROMETEOROLOGICAL DISASTERS AND FORECAST SYSTEM IN THE PROCESS OF CLIMATE CHANGE

***Hakan DOĞAN***

*Turkish State Meteorological Service*

**Abstract**

There are changes in the frequency, intensity, geographical distribution and duration of extreme weather and climate events, with the impact of global climate change. The increase in extreme weather and climate events will continue according to the Assessment Reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Accordingly, it is expected that there will be an increase in disasters caused by natural hazards. Although earthquakes are the most widely known nature-based disasters, disasters that occur due to severe and extreme meteorological events constitute a large part of nature-based disasters. As in the whole world, meteorological disasters have been occurring quite frequently in our country, which has large geographic and different climatic regions, and have resulted in serious losses of life and property during the recent periods. There has been a considerable increase in the number and the strength of meteorological disasters, especially after the 2000s. The transformation of severe and extreme meteorological events into disasters is a natural consequence of the failure of human systems to be prepared and take precautions against extreme weather and climate risks, as well as local or regional geographical factors such as incorrect settlement and incorrect land use practices. Experienced meteorological disasters and their consequences reveal the importance of considering forecasts and early warnings, being ready to overcome severe and extreme weather events before they turn into disasters, or even if they do, for the least possible damage, taking the right precautions in a timely manner. The prediction of atmospheric events has brought many conveniences because of the widespread use of High-Performance Computing Systems. With the prepared numerical weather prediction models, changes and atmospheric events that may occur in the atmosphere from minute to hour, from day to week can be predicted. It is also very important that the produced early warning products can be understandable by the public, as well as obtaining forecasts to reduce disaster hazards. Turkish State Meteorological Service (TSMS), which is a forecasting and early warning institution, presents the meteorological forecasts and early warnings it has prepared to the information of all public and relevant public institutions/organizations and continues its activities as the first part of the disaster risk reduction chain.

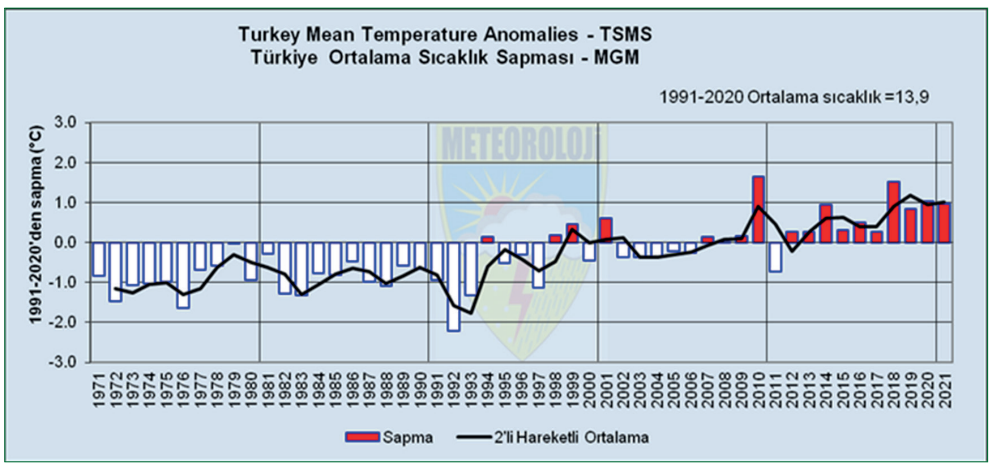
***Keywords***

*Climate, Climate change, Meteorological disasters, Prediction, Early warning*

## 1. İklim İzleme, Analiz Değerlendirme

Geleneksel karbon tabanlı enerji üretim sistemleri ve endüstriyel faaliyetler, atmosferde var olan sera gazı miktarını artırmakta ve iklim değişikliğine insan kaynaklı katkı olarak ortaya çıkmaktadır. Yanlış arazi kullanımı ile hızlı ve plansız kentleşme, önemli yutak alanlarından ormanlar ve tarım alanlarının miktarını azaltmaktadır. Diğer taraftan, asfalt ve betonla kaplanan ve yeşil zeminlerin azaldığı şehirler, kentsel ısı adalarına neden olmaktadır.

İklimde meydana gelen değişiklikler Dünya Meteoroloji Teşkilatı (WMO) öncülüğünde, ulusal meteoroloji teşkilatları tarafından yapılan gözlem ve ölçümler ile değerlendirilmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü verilerine göre; 2021 yılı Türkiye ortalama sıcaklığı normalin (1981-2010) 1,4°C üzerine çıkarak 14,9°C olarak gerçekleşmiştir. Türkiye'de kaydedilen en sıcak 4. yıl olan 2021 yılı, WMO tarafından kabul edilen yeni sıcaklık normalinin (1991-2020) de 1.0°C üzerindedir (Şekil 1) (MGM, 2022a).



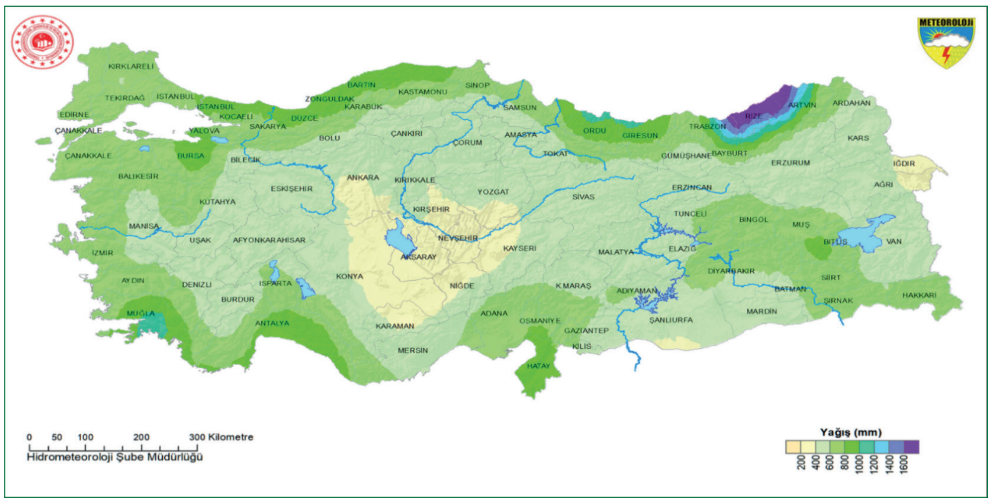

***Şekil 1.*** *Türkiye ortalama sıcaklıklarının sapması (1971-2021)*

2021 yılı Türkiye alansal yağış ortalaması, 573,4 mm olan yağış normalinin (1991-2020) %8,5 altına düşerek 524,8 mm olarak hesaplanmıştır. 2021 yağışları aynı zamanda, bir önceki yıl yağışlarına göre %4,9 artış göstermiştir (Tablo 1) (MGM, 2022b).

***Tablo 1.*** *Türkiye Alansal Yağış Dağılımı ve Geçmiş Dönem Karşılaştırması*

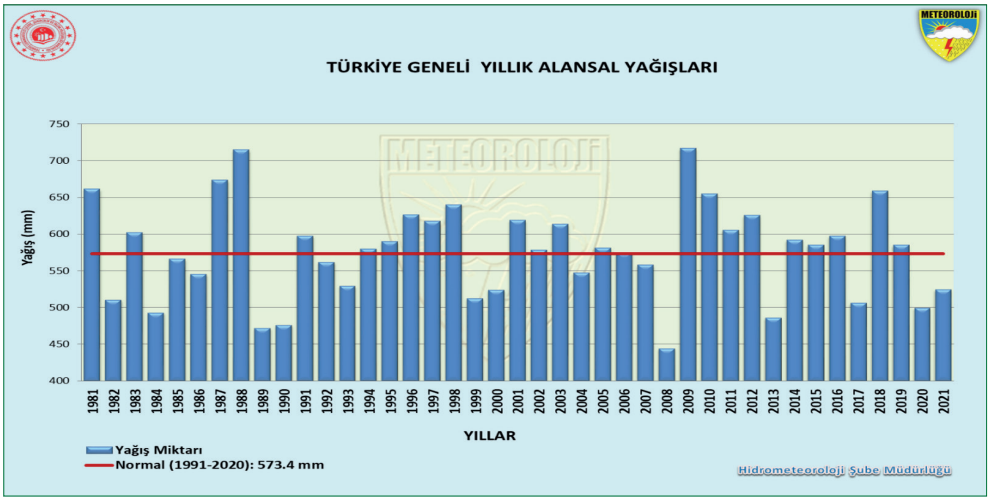
| **Alansal Yağış Durumu (01 Ocak 2021 - 31 Aralik 2021)** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Bölgeler** | **Yağış (mm)** | **Normali (1991-2020) (mm)** | **2020 Yılı Yağış (mm)** | **Normale Göre Değişim (%)** | **2020 Yılına Göre Değişim (%)** |
| Türkiye Geneli | 524,8 | 573,4 | 500,1 | -8,5 Azalma | 4,9 Artma |

Türkiye geneli yıllık alansal yağış normali 573,4 mm'dir (1991-2020). Türkiye yağış normallerine göre, en yüksek yağış miktarları, 1600 mm'yi aşan yıllık ortalama yağışlar ile Rize ve Artvin kıyıları olurken, en az yağış alan bölgeler İç Anadolu'nun orta kesimleri ile Şanlıurfa ve Iğdır çevreleridir (Şekil 2).

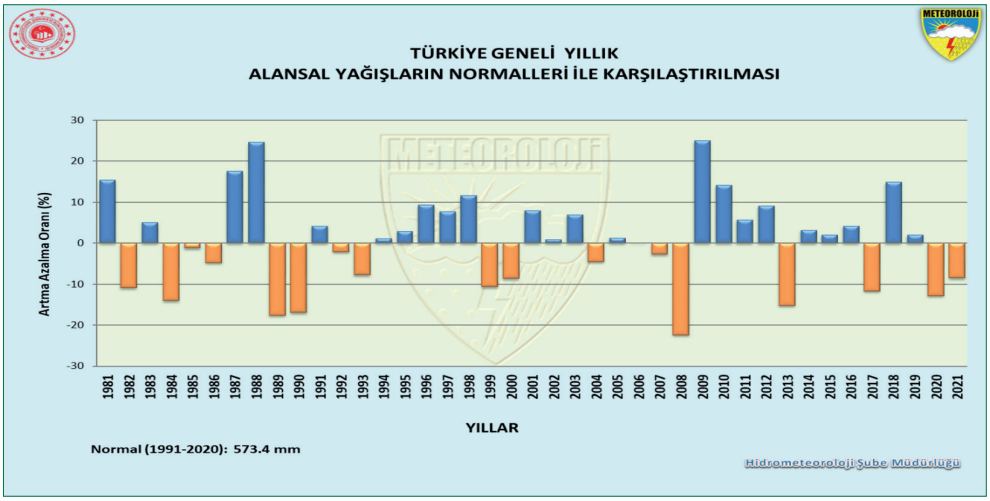



***Şekil 2.*** *Türkiye alansal yağış normalleri (1991–2020) (MGM, 2022b)*

444,9 mm yıllık ortalamaya sahip olan 2008 yılı, Türkiye yağışlarının kayıt altına alındığı 1930 yılından günümüze kadar görülen en kurak yıl olmuştur. 2020 ve 2021 yılı yağışları da 1991-2020 normalinin altında kalmıştır (Şekil 3 ve 4).




***Şekil 3.*** *Türkiye geneli yıllara göre yağış dağılımı (MGM, 2022b)*




***Şekil 4.*** *Türkiye geneli yıllık yağışların normallerine göre değişim oranları (MGM, 2022b)*

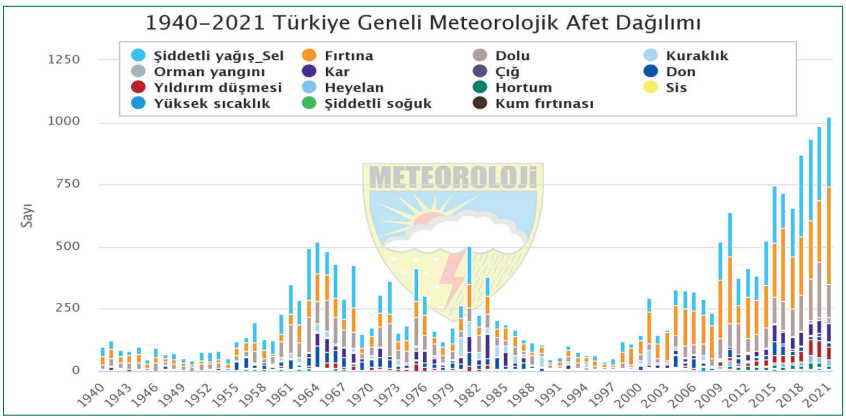
## 2. Meteorolojik Afetler

Yeryüzünde meydana gelen doğa olaylarının canlı ve cansız varlıklar üzerinde önemli ölçüde olumsuz etkiler yaratması, doğa kaynaklı afetler veya doğal afetler olarak ifade edilmektedir. Birleşmiş Milletler (BM) tarafından doğa kaynaklı afetler, toplumun sosyoekonomik ve sosyokültürel faaliyetlerini önemli ölçüde aksatan, can ve mal kayıplarına neden olan fakat yerel imkânlar ile baş edilemeyen doğa olayları olarak tanımlanmıştır (Kadıoğlu, 2012).

Meteorolojik ve hidrometeorolojik karakterli afetler, doğa kaynaklı afetlerin büyük bölümünü oluşturmaktadır. Dünya üzerinde meydana gelen 31 doğa kaynaklı afetin 28'i meteorolojik kaynaklıdır (Kadıoğlu, 2012). Yağışlar, şiddetli yerel fırtınalar, tropikal fırtınalar, şiddetli kış şartları, kırağı, don ise hava şartları tarafından doğrudan oluşturulan afetlerdir (Kadıoğlu, 2008). Dünya Meteoroloji Teşkilatı (WMO) tarafından 2020 yılında yayınlanan iklim raporunda; 1970-2019 döneminde yaşanan doğal afetlerin yaklaşık %79'unun doğrudan veya dolaylı meteorolojik kaynaklı olduğu ifade edilmiştir. Doğa kaynaklı afetlerde yaşanan can kayıplarının %56'sı, maddi kayıpların ise %75'i meteorolojik karakterli afetlerden kaynaklanmaktadır. (WMO, 2020).

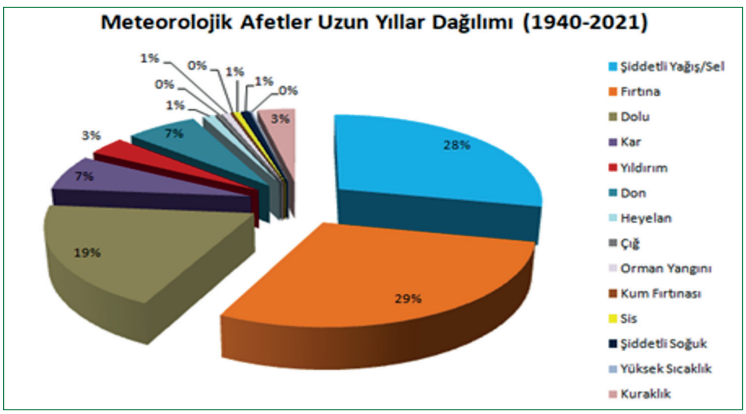
Ülkemizde özellikle son yıllarda, değişen iklim koşullarının da etkisi ile meteorolojik afetlerin oluşum sayıları, etkili oldukları süre ve şiddetlerinin arttığı, daha önce sık görülmeyen bazı afet türlerinin daha fazla meydana gelmeye başladığı görülmektedir. İklim değişikliğine bağlı olarak; kuraklık, çölleşme, orman yangınları, sel, çığ, heyelan ve fırtına gibi meteorolojik karakterli doğal afetlerin neden olduğu zararların en aza indirilmesi büyük önem taşımaktadır. 1940 yılından günümüze Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından tutulan Fevk Kayıtları, başlangıçtan itibaren teknolojinin imkân verdiği çeşitli şekillerde kayıt altına alınmıştır. Son 80 yılda yaşanan meteorolojik ve hidrometeorolojik karakterli afet kayıtları incelendiğinde, özellikle 2000'li yıllardan itibaren daha fazla sayıda afet yaşandığı görülmektedir.

2021 yılında yaşanan meteorolojik karakterli afetler detaylandırıldığında, bölgelere göre afet farklılıkları gözlenmekle birlikte, toplam 1024 afetin büyük bölümünü Fırtına, Şiddetli Yağış/Sel ve Dolu olduğu görülmektedir. (MGM, 2022c). 2021 yılında yaşanan meteorolojik kaynaklı afetlerin toplam sayısının, 1940-2021 dönemi yıllık ortalamasının çok üzerinde olduğu ve gözlem periyodu içinde en fazla afet yaşanan yıl olarak kayıtlara geçtiği görülmüştür (Şekil 5).




***Şekil 5.*** *Türkiye'de 1940-2021 periyodunda gözlenen meteorolojik afetlerin yıllık dağılımları*

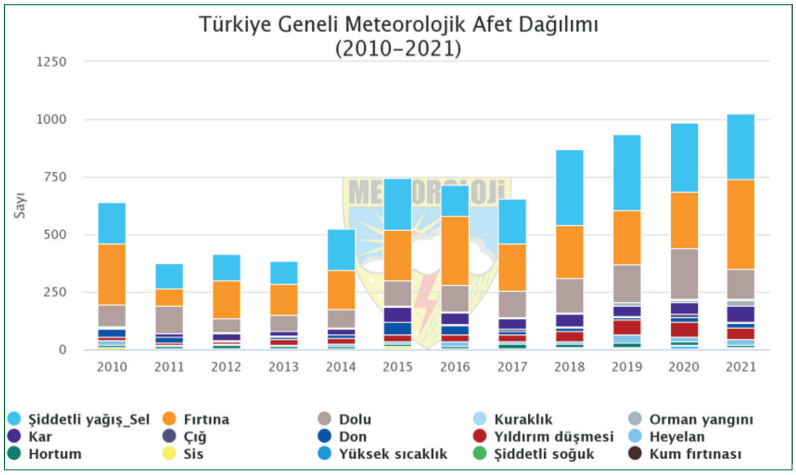
Fevk rasatları veri tabanında, 1940-2021 döneminde yaşanan meteorolojik karakterli doğa kaynaklı afetlerin %29'unun Fırtına, %28'inin Şiddetli Yağış ve Sel, %19'unun ise Dolu olduğu bulunmuştur. Ayrıntılı afet istatistikleri Şekil 6'da verilmiştir.



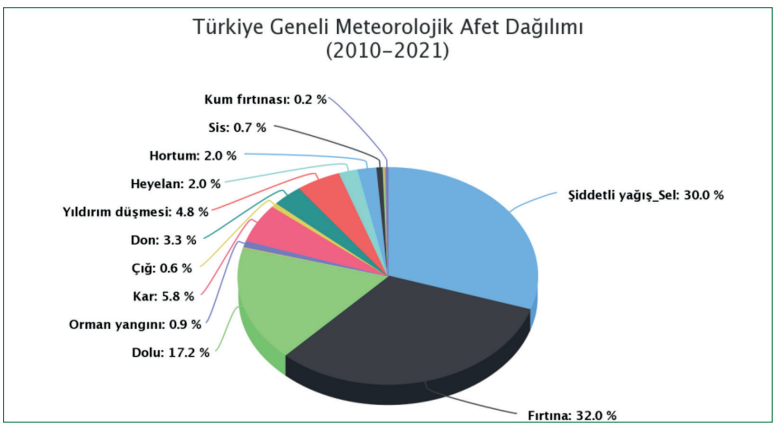

***Şekil 6.*** *Türkiye'de 1940-2021 periyodunda meydana gelen meteorolojik afetlerin oluşum yüzdeleri*

2000'li yıllardan itibaren hem dünyada hem de ülkemizde yaşanan meteorolojik karakterli afetlerin sayısında ve sıklığında artış yaşanmıştır. İklim değişikliğinin yanı sıra, plansız kentleşme, kentsel ısı adası gibi yerel faktörler meydana gelen afetlerin etkisini daha da artırmaktadır. Günlük yaşam üzerinde önemli etkileri olan sel, taşkın ve fırtınalar can ve mal kayıplarına neden olmaktadır.

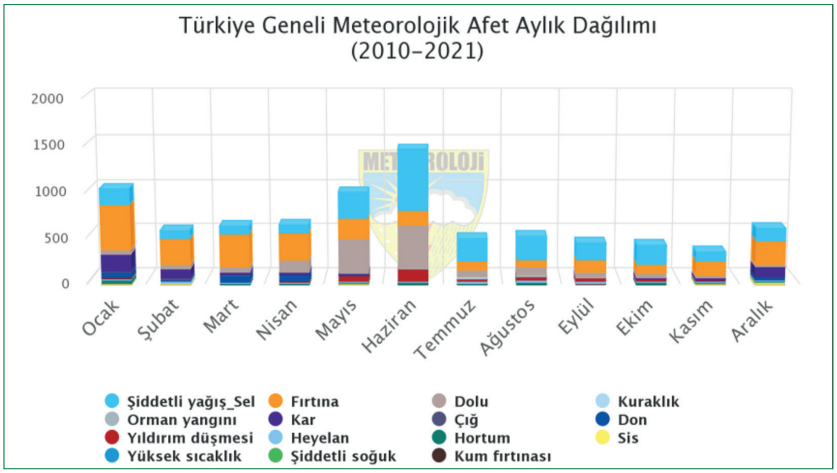
Ülkemizde, 2010-2021 yılları arasında yaşanan 8274 meteorolojik karakterli afetin alansal ve zamansal dağılımında da farklılıklar gözlenmektedir. Yaşanan meteorolojik karakterli afetlerin; afet türü ve afet yoğunluğu ile aylık, yıllık ve coğrafi dağılımları Şekil 7, 8, 9 ve 10'da verilmiştir.




***Şekil 7.*** *Türkiye'de 2010-2021 yılları arasındaki meteorolojik afetlerin yıllara göre dağılım (MGM, 2022c)*




***Şekil 8.*** *Türkiye'de 2010-2021 yılları arasındaki meteorolojik afetlerin oluşum yüzdeleri (MGM, 2022c)*




***Şekil 9.*** *Türkiye'de 2010-2021 yılları arasındaki meteorolojik afetlerin aylara göre dağılımı (MGM, 2022c)*

2010-2021 döneminde kaydedilen afetler incelendiğinde en fazla afetin Haziran ayında meydana geldiği görülmektedir. Haziran ayını kış ve ilkbahar ayları takip etmektedir. Fırtına ile şiddetli yağış/sel afetleri yılın her döneminde yaşanmakla birlikte mevsimsel farklılıklar gözlenmiştir (Şekil 9).

2010-2021 dönemi fevk kayıtları dikkate alınarak oluşturulan meteorolojik afetlerin coğrafi dağılımı Şekil 10'da verilmiştir. Akdeniz ve Ege kıyılarında daha fazla sayıda afet görülürken, iç kesimlere doğru afet sayılarında nispeten azalmalar olduğu tespit edilmiştir (Şekil 10).




***Şekil 10.*** *Türkiye'de 2010-2021 yılları arasındaki meteorolojik afetlerin illere göre dağılımı (MGM, 2022c)*

## 3. Hava Tahmini

### 3.1. Sayısal Hava Tahmini (SHT)

Sayısal Hava Tahmini (SHT), atmosferin dinamik yapısı ile fiziksel mekanizmalarını ifade eden bir dizi diferansiyel denklemin nümerik yöntemler yardımı ile çözülerek gelecekteki hava koşullarının tahmin edilmesi sürecidir. Atmosferi tarif eden bu diferansiyel eşitlikler diagnostik ve prognostik denklemler olmak üzere iki başlık altında toplanır. Diagnostik fonksiyonlar basınç, yoğunluk ve sıcaklık gibi parametreleri tanımlar. Prognostik fonksiyonlar ise yatay rüzgâr bileşenleri, yüzey basıncı ve bunların zamanla değişimi gibi parametreleri tanımlar (Kabaoğlu Hatice vd., 2020; Uzun vd., 2018).

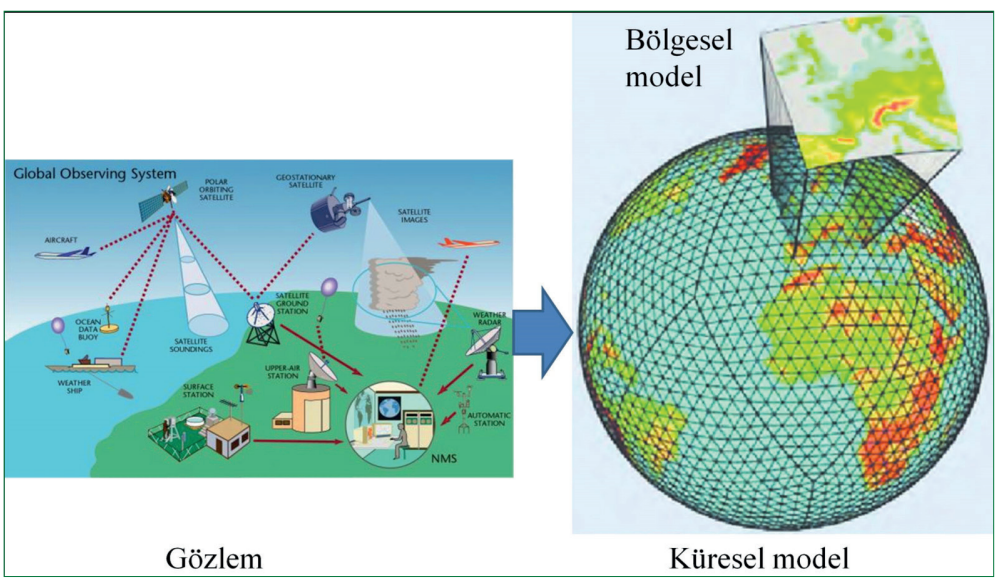
SHT modelleri, hidrostatik ve hidrostatik olmayan modeller olmak üzere kendi içerisinde ikiye ayrılır. Hidrostatik modeller, basınç kuvveti ile yerçekimi arasındaki kuvvetin dengede olduğu varsayımına göre çalışır. Bu modeller düşey hareketi doğrudan hesaplamaz. Küresel modellerin çoğu bu esaslara göre çalışır. Büyük ölçekli alanların ve hava olaylarının tahmininde bu modeller kullanılır. Bölgesel modellere göre daha az süper hesaplama kapasitesine ihtiyaç duyar. Küresel modellerin girdilerini meteorolojik gözlem istasyon rasatları, gemi, uçak, şamandıra ve uydu

gözlemleri gibi pek çok kaynaktan elde edilen veriler oluşturur. Hidrostatik olmayan modeller ise düşey hareketi de dikkate alır. Dar bölgelerde gerçekleşen konvektif faaliyetleri tahmin etmede küresel modellere göre daha başarılıdır. Bu tür modeller sınırlı alan modeli olarak da adlandırılır. Çözünürlüğü küresel modele göre daha yüksektir. Hem barındırdığı fonksiyonlar daha karmaşık olduğundan, hem de daha yüksek çözünürlüklü olduğundan küresel modele göre daha fazla süper bilgisayar kapasitesine ihtiyaç duyar (Şekil 11). Bu modellerin girdi verileri küresel model çıktılarından oluşur (Fuka vd., 2014; Lara-Fanego vd., 2012; Min vd., 2019; Skamarock vd., 2019; Yang vd., 2006).

SHT'de yüksek çözünürlük oldukça önemlidir. Çünkü yüksek çözünürlük topografyanın etkilerini daha iyi tanımlar. Ayrıca yüksek çözünürlüklü modeller çok küçük alanlardaki meteorolojik hadiseleri düşük çözünürlüklü modellere göre daha başarılı tahmin eder (Kim vd., 2021).

SHT modellerinde bir diğer önemli konu ise modellerin parametrize ve konfigüre edilmesidir. SHT modelleri atmosferi gridleyerek hesaplar. Parametrizasyonda modelin çalışacağı bazı fizik yaklaşımları ile sabitler belirlenir. Özellikle çok küçük alanlarda gerçekleşen hareketlerin tahmini için parametrizasyon kritiktir. Konfigürasyonda ise çözünürlük, zaman adımı, süre alan gibi ayarlar yapılır.

Çözünürlük, zaman adımı ve süre artırıldıkça model çalışmak için daha fazla süper bilgisayar kaynağı ister. Ayrıca çözünürlüğü artırmak için küresel modellerde daha yoğun gözlem verisi, bölgesel modellerde ise daha yüksek çözünürlüklü bölgesel model verisi sağlanmazsa çözünürlük artırmanın anlamı kalmaz.



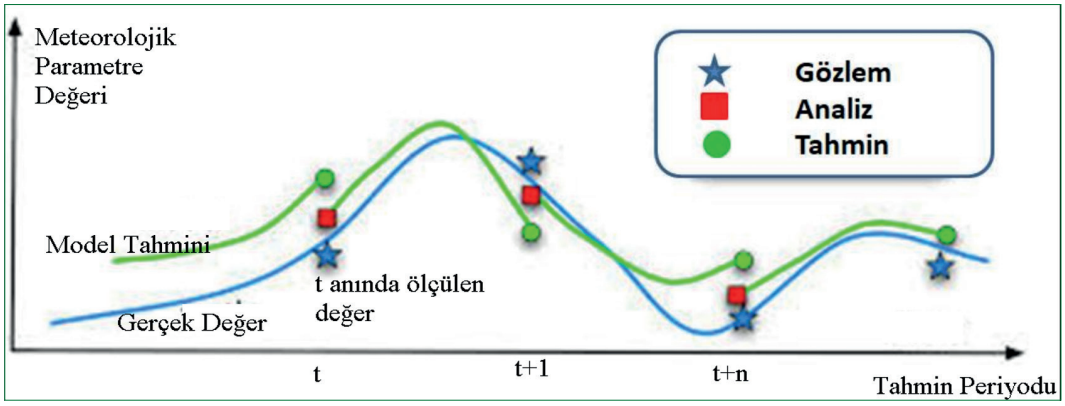

***Şekil 11.*** *Gözlemden Sayısal Hava Tahmine Gösterim Şeması (Ernst vd., 2007; WMO, 2015)*

### 3.2. Deterministik ve Ensemble ((Predıctıon System (EPS)) Modelleri

Atmosferin davranışı kaotiktir. Ayrıca her ne kadar meteorolojik gözlem sayısı dünya genelinde büyük oranda artmış olsa da SHT için halen yetersizdir. Bu gözlemlerde (ölçüm, kalibrasyon vb.) bazı hatalar da mevcuttur. Atmosferin işleyişi hakkında net olarak ortaya konulamamış bazı etkiler de (toz gibi kirleticilerin etkileri ve bunların ölçümü gibi) mevcuttur. Ayrıca dinamik ve fizik denklemlerin nümerik çözümlerinde de yaklaşımdan kaynaklı bir miktar hata ortaya çıkmaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı SHT modelleri kaçınılmaz olarak hataya doğru bir miktar eğilim gösterir. Deterministik modeller gözlem verilerinden elde edilen başlangıç veri seti ile çalıştırılır ve tek bir tahmin sonucu üretir. Aynı başlangıç verileri kullanarak model farklı konfigürasyonlarda çalıştırıldığında veya farklı bir model çalıştırıldığında tahmin değişmektedir. Başlangıç verileri istatistiksel yöntemlerle bir miktar değiştirilerek (pertürbasyon) ve farklı model birlikte çalıştırılarak Toplu Tahmin Sistemi (Ensemble Prediction System – EPS) gerçekleştirilmiş olur. Sınırsız sayıda EPS üyesi ortaya konabilir. Fakat bunu süper bilgisayar kapasitesi limitler. EPS modeller genellikle deterministik modellerin yarı çözünürlüğünde ve daha küçük alanda daha kısa bir zaman için çalıştırılır (Bartholmes vd., 2009; Palmer, 2012).

### 3.3. Veri Asimilasyonu

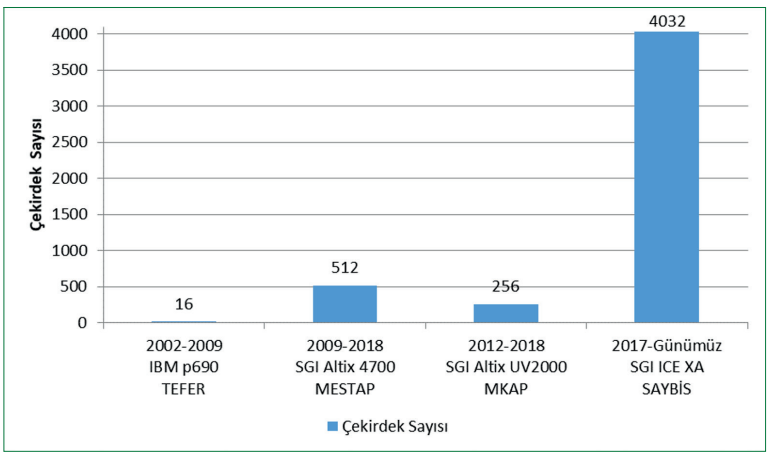
SHT'de modellerin tutarlılık oranını artırmada en verimli yaklaşımlardan biri veri asimilasyonudur (Şekil 12). Veri asimilasyonu; model çalıştırıldığı esnada yeni gelen güncel gözlemlerin tahmin döngüsüne katılarak, modelin hataya olan eğilimini tekrar en doğru tahmine yaklaştırılması işlemidir. Veri asimilasyonu, güncel gözlem bilgileri ile modeli bir araya getirerek atmosferin gerçek durumuna en iyi yaklaşımı bulmaya çalışır. 3DVAR ve 4DVAR olmak üzere iki adet veri asimilasyon tekniği SHT'de sıkça kullanılmaktadır. Veri asimilasyonunda en kritik konu gözlem verilerinin kaliteli ve doğru olmasıdır. Çünkü hatalı veri tahmini büyük oranda bozabilir (Bocquet vd., 2015; Reichle, 2008).




***Şekil 12.*** *Veri asimilasyonu*

### 3.4. Meteoroloji Genel Müdürlüğünde Gerçekleştirilen SHT Çalışmaları

Meteoroloji bilimi multidisipliner alan içerisinde yer almaktadır. Sayısal Hava Tahmini bilgisayar, matematik, fizik başta olmak üzere birden çok farklı bilim dalının bir arada çalıştığı bünyesinde yüksek teknoloji barındıran konulardan biridir. Günümüzde SHT'nin en temel aracı süper bilgisayarlardır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü uzun yıllardır süper bilgisayar çalıştırmaktadır (Şekil 13).




***Şekil 13.*** *Meteoroloji Genel Müdürlüğünde SHT Amaçlı Kullanılan Süper Bilgisayarlar*

Gelecekte teknolojik ve SHT ihtiyaçlarındaki artışa paralel biçimde YBH sistemi de kaçınılmaz olarak yenilenecektir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü SHT operasyonlarını (Tablo 2)'deki modellerle yürütmektedir.

***Tablo 2.*** *Meteoroloji Genel Müdürlüğünde Kullanılan SHT Modelleri*

| Model | ECMWF | ALARO | AROME | WRF |
|---|---|---|---|---|
| **Yatay Çözünürlük** | 9 km | 4,5 km | 1,5 km | 3 km |
| **Düşey Çözünürlük** | 137 seviye | 60 seviye | 60 seviye | 61 seviye |
| **Tahmin Periyodu** | 240 saat | 72 saat (18 UTC'de 60 saat) | 48 saat | 72 saat |
| **Güncellenme Sıklığı** | 00/12 UTC | 00/06/12/18 UTC | 00/06/12/18 UTC | 00/06/12/18 UTC |

Meteoroloji yapısı itibari ile uluslararası iş birliğine dayalı bir kuruluştur. Meteoroloji Genel Müdürlüğü küresel model çalıştıran ve geliştiren ECMWF ve ALADIN kuruluşlarının üyesidir. Kurumumuz ECMWF'den ve ALADIN'den küresel model verilerini her gün sunucularına indirmekte ve tahmin operasyonlarında kullanmaktadır. Ayrıca ECMWF kuruluşunun süper bilgisayar olanaklarını kullanmaktadır. WRF bölgesel modeli SAYBİS Yüksek Başarımlı Hesaplama (YBH) sisteminde çalıştırılmaktadır ve girdi olarak ise ECMWF küresel model verilerini kullanılmaktadır. ALARO ve AROME modelleri de SAYBİS YBH sisteminde çalıştırılmakta olup küresel model verileri ALADIN'den alınmaktadır.

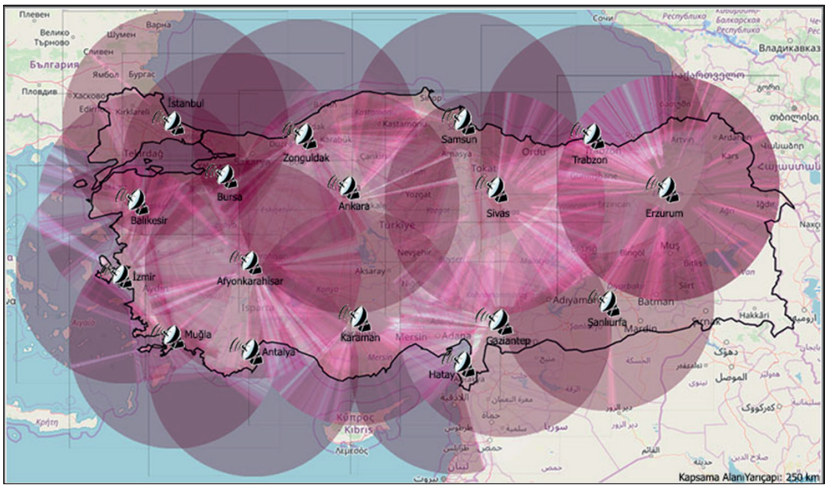
Meteoroloji Genel Müdürlüğünde 17 toplu (ensemble) üyesi bulunan ALAEF EPS modeli çalıştırılmaktadır. Bu modelin yatay çözünürlüğü 10,9 km, düşey çözünürlüğü ise 45 seviyedir. Günde 2 defa (00 ve 12 UTC) çalıştırılan bu sistemin tahmin periyodu 72 saattir.

Ayrıca Meteoroloji Genel Müdürlüğünde ALARO ve AROME ile veri asimilasyon çalışmaları sürdürülmektedir. Veri asimilasyonuna *sinoptik, atmosferik motion vector, temp* ve *uydu-radyans* verileri katılmaktadır. Ayrıca veri asimilasyonu için AMDAR, PILOT, BUOY, GNSS, IASI, ASCAT, RADAR, MODE-S, GPS gibi farklı veri kaynakları hakkında kavramsal boyutta çalışmalar sürdürülmektedir. Meteoroloji Genel Müdürlüğünde yer verilerinin asimilasyonunda optimal interpolasyon yöntemi (CANARI), yüksek seviyede ise 3DVAR kullanılmaktadır. Ayrıca GETOBS yöntemi ile gözlem verileri gruplandırılmaktadır.

## 4. Radar Meteorolojisi

Afetlere neden olan kuvvetli meteorolojik hadiselerin izleme, takip, tahmin ve uyarıları için yaygın olarak kullanılan önemli araçlardan biri meteoroloji radarlarıdır. Meteoroloji radarlarının kullanım amacı özetle;

- Yağış sistemlerinin türü, yönü, hızının belirlenmesi,
- Yağışların yeri, zamanı ve miktarının belirlenmesi,
- Tahmin ve erken uyarı sistemleri desteklenerek can ve mal kayıplarının önlenmesi veya azaltılması,
- Uçuş güzergâhlarının oluşturulması,
- Uçakların kalkış ve inişlerinde önem taşıyan *rüzgar şiri, mikroburst, makroburst* ve *downburst* ile kuvvetli rüzgarların büyüklüklerinin alansal ve zamansal olarak tespit edilmesi.




***Şekil 14.*** *Meteoroloji radarları kapsama alanları*

Meteoroloji Genel Müdürlüğü bünyesinde kurulan toplam 17 adet C-Band, 2 adet X-Band, 2 adet HF Deniz radarından oluşan bir ağ ile Türkiye'nin hemen hemen tamamı alansal olarak kapsanmıştır (Şekil 14).

## 5. Meteorolojik Erken Uyarılar

Son yıllarda yüksek tahribat ve kayıplara sebep olan hava ve iklim ile ilişkili şiddetli hava olayları ve bunlara bağlı afetler, dünyanın ve ülkemizin üzerinde önemle durduğu bir konudur. Meteorolojik Afetlere yönelik olarak yapılacak tahmin ve erken uyarıların tutarlılığının artırılması, can ve mal kayıplarının asgari düzeye indirilmesi için zaruridir.

Ülkemizde özellikle son yıllarda, değişen iklim koşullarının da etkisi ile meteorolojik afetlerin oluşum sayıları, etkili oldukları süre ve şiddetlerinin arttığı, daha önce sık görülmeyen bazı afet türlerinin daha fazla meydana gelmeye başladığı önceki bölümde belirtilmişti. Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından afet risk yönetimi kapsamında üretilen tahmin ve erken uyarılar, afet öncesinde olumsuz etkilerin azaltılmasını sağlarken afet sırası ve sonrasında da yapılan çalışmalara katkısı bulunmaktadır.

MGM tarafından afet risklerinin azaltılmasına yönelik hazırlanan tahmin ve uyarılar, basın ve yayın organlarının yanı sıra AFAD ve valilikler başta olmak üzere, merkezi ve yerel kuruluşlar ile paylaşılmaktadır. Tahmin ve uyarların halkımıza daha yaygın ulaşımı için SMS, e-posta, web sayfası ve cep telefonu uygulaması gibi çeşitli platformlar üzerinden de paylaşılmaktadır.

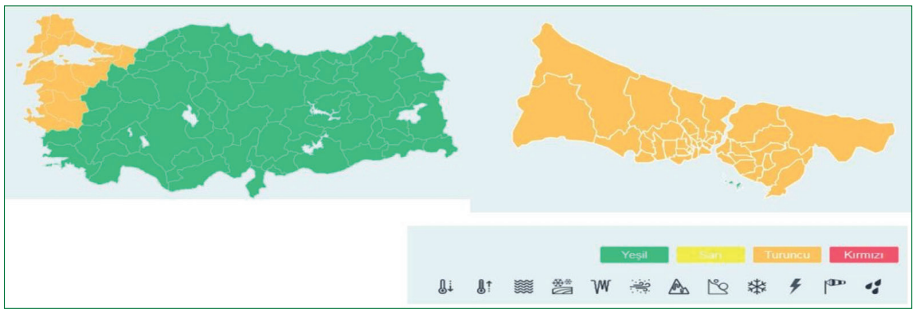
### 5.1. MeteoUYARI

MGM tarafından yapılan tahmin ve erken uyarıların, yetkililer ve vatandaşlarımız tarafından daha kolay anlaşılması için "MeteoUYARI" sistemi geliştirilmiştir. Günlük hayatı olumsuz etkileyen ve meteorolojik karakterli afetlere neden olması muhtemel kuvvetli ve çok kuvvetli meteorolojik olaylara ilişkin uyarılar, 9 Şubat 2019 tarihinden itibaren "MeteoUYARI" sistemi ile kamuoyuna duyurulmaya başlanmıştır. MGM'nin kendi özkaynakları ile geliştirdiği bu sistemde tanımlanan renk kodları ile her il ve ilçe için 2 günlük uyarılar yayınlanmaktadır. 34 Avrupa ülkesi tarafından da kullanılan renk sınıflandırılmaları ve açıklamaları Tablo 3'te verilmiştir.

MeteoUYARI ile Soğuk/Sıcak Hava Dalgası, kuvvetli rüzgâr ve fırtına, yağmur ve sağanak, sis, zirai don, buzlanma ve don, toz taşınımı, kar erimesi, çığ ve kar hadiseleri için uyarılar yayınlanmaktadır. MeteoUyarı uygulamasında Türkiye geneli 2 günlük uyarılar gösterilmektedir. İlçelere ait detay bilgilere seçilen il özelinde erişmek mümkündür (Şekil 15).

***Tablo 3.*** *MeteoUYARI Renk Kodları ve Açıklamaları*

| Renk Kodu | Uyarı Seviyesi |
|---|---|
| YEŞİL | Uyarı yapılmasını gerektiren meteorolojik hadise tahmin edilmemektedir. |
| SARI | Hava durumu potansiyel tehlikelidir. |
| TURUNCU | Hava durumu tehlikelidir. |
| KIRMIZI | Hava durumu çok tehlikelidir. |

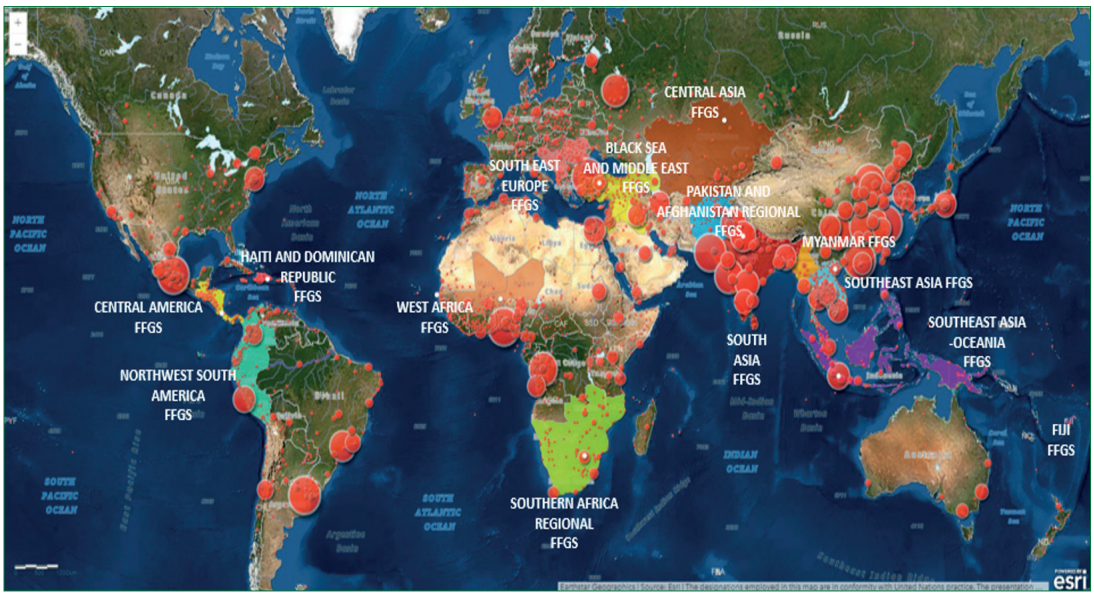



***Şekil 15.*** *MeteoUYARI, Türkiye geneli ve İstanbul ilçelerine ait uyarılar*

### 5.2. Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemi ( Flash Flood Guıdance, FFGS)

Ani taşkın, kısa süreli (6 saat ve daha az) ve göreceli olarak yüksek debiye sahip taşkınlardır (WMO, 2022). Ani taşkınlar çevresel ve sosyo-ekonomik zararlara neden olan, yılda 5.000'den fazla kişinin hayatını kaybettiği dünyanın en ölümcül doğal afetleri arasındadır. Taşkın türleri içerisinde ani taşkınlar en yüksek ölüm oranına sahip olanıdır ve %85'ini oluşturmaktadır. WMO tarafından ülke düzeyinde yapılan anket sonuçlarına göre 139 ülkeden 105'i ani taşkınların dünyadaki en önemli iki doğal afet arasında olduğunu bildirmektedir. Ülkemizde de en yaygın görülen meteorolojik karakterli doğal afetlerin başında sel ve taşkınlar gelmektedir, 2000'li yıllardan itibaren sel olaylarındaki artış daha bariz hale gelmiştir (MGM, 2020).

Şiddetli yağış bırakan konvektif sistemler, cephesel sistemler, ani kar erimeleri ve tropik fırtınalar ani taşkınlara neden olmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC, 2021) raporları iklim değişikliği ve değişkenliği sebebiyle kısa sürede şiddetli yağış bırakan fırtınaların bu yüzyılın sonuna kadar frekansı ve şiddetinin artacağını göstermektedir. WMO'nun yaptığı araştırmalara göre dünyadaki ulusal hidrometeoroloji teşkilatlarının bir kısmı ani taşkın erken uyarı sistemine sahip değildir ve söz konusu servislerinin kapasitelerinin arttırılması gerekmektedir. Kapasite artırımı amacıyla WMO'nun 2007 yılında düzenlenen XV. kongresinde "Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemlerinin (FFGS)" dünya genelinde oluşturulması kararlaştırılmıştır (WMO, 2007). FFGS projesi WMO, Birleşik Devletler Ulusal Okyanus ve Atmosfer Dairesi (NOAA), Hidrolojik Araştırma Merkezi (HRC) ve ABD Uluslararası Kalkınma Kurumu (USAID) iş birliği ile geliştirilmiştir. Şekil 16'da ani taşkın erken uyarı sistemleri global yoğunluk haritası görülmektedir.

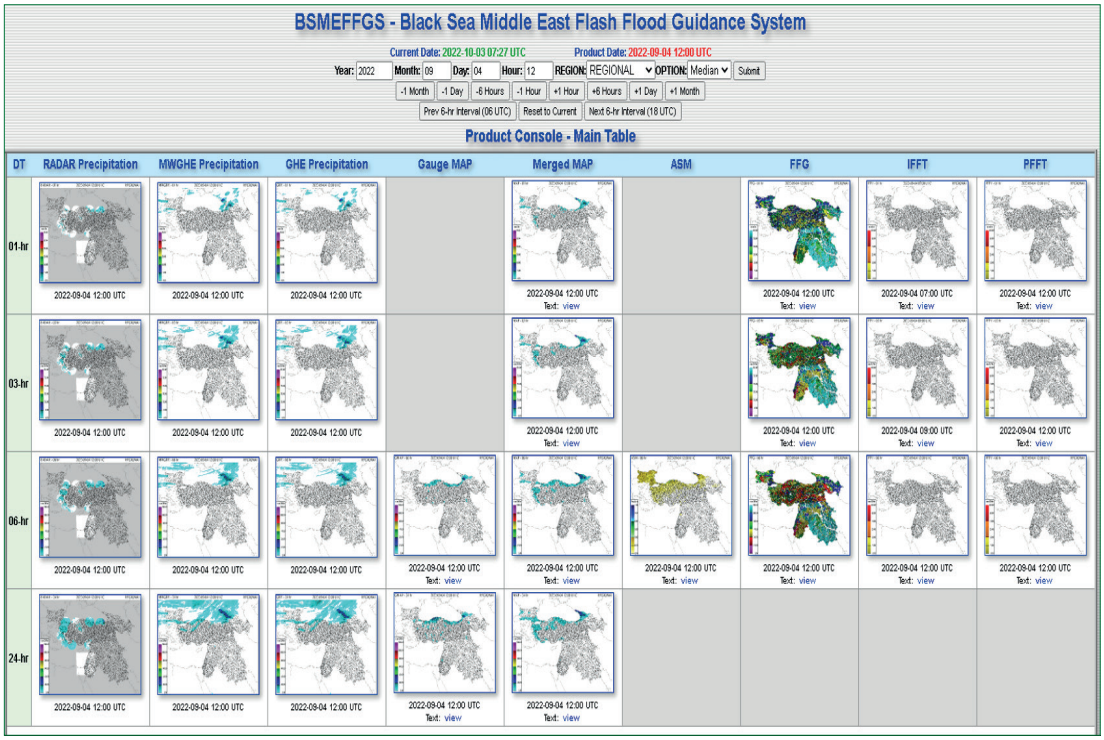



***Şekil 16.*** *Global Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemleri (WMO, 2022)*

Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemi kapsamında küresel ölçekte bugüne kadar 12 bölgesel merkez oluşturulmuş olup 8 bölgesel merkez operasyonel olarak kullanıma açılmıştır ve toplamda 22 Bölgesel Merkezin oluşturulma kararı alınmıştır. Böylece dünya genelinde altmıştan fazla ülkede proje uygulamaya konulmuştur. Bu projenin bir parçası olarak, Karadeniz ve Ortadoğu Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemi ve Güneydoğu Avrupa Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemi geliştirilmiştir. Türkiye her iki sistemin de bölgesel merkezi seçilmiştir. Şekil 17'de arayüzü görülmektedir.

Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemi yüzey akış eşik modeli, toprak nemi modeli, ani taşkın erken uyarı ve kar modeli olmak üzere 4 modelden oluşmaktadır (Anderson, 2006; Georgakakos, 2006; K. Ajami vd., 2004). Model alt havzalarda belirli bir süre için yüzey akış eşik değerini bulur ve bu eşik değeri verecek yağış değerinin hesaplanması ilkesiyle çalışır. Türkiye için projede kullanılan alt havzalar topografya verileriyle oluşturulmuştur ve sayısı 11800 civarındadır.

Hidrometeorolojik veriler ile toprak ve bitki örtüsü verileri model kalibrasyonu ve model parametrelerinin oluşturulması amacıyla kullanılmıştır. Modelde kullanılan yer gözlemleri, uydu ve RADAR verileri ile ALADIN, ECMWF ve WRF sınırlı alan model çıktıları yağış verileri kullanılmaktadır. (MGM, 2015). Ani Taşkın Erken Uyarı Modeli ürün ve çıktıları ile erken uyarıların hazırlanması ve gerekli tedbirlerin alınması sayesinde can ve mal kayıplarının önemli ölçüde azalacağı öngörülmektedir.

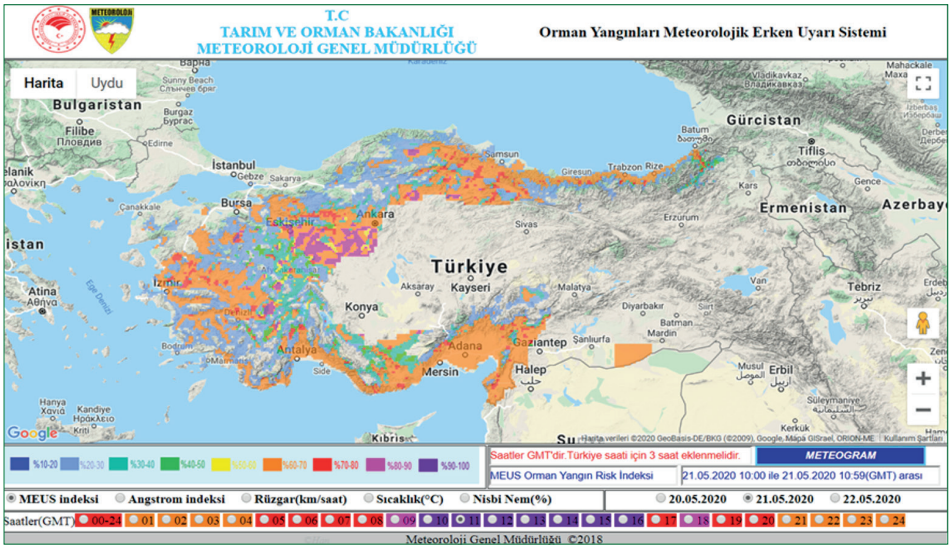



***Şekil 17.*** *Karadeniz ve Ortadoğu Ani Taşkın Erken Uyarı Sistemi ara yüzü*

### 5.3. Orman Yangınları Meteorolojik Erken Uyarı Sistemi (MEUS)

MGM özkaynakları kullanılarak geliştirilen Orman Yangınları Meteorolojik Erken Uyarı Sistemi (MEUS) ile orman yangını oluşması muhtemel bölgeler ve orman yangınlarının oluşma ihtimali olan zamanlar belirlenerek önlem alınmasının sağlanması hedeflenmiştir.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından orman yangınları için önceden tedbir alınabilmesine yönelik, Orman Yangınları Meteorolojik Erken Uyarı Sistemi (MEUS) hazırlanmıştır. Sıcaklık, nem, rüzgâr gibi orman yangınları için önemli olan meteorolojik parametreler değerlendirilerek hazırlanan sistem karar vericiler için önemli bir yardımcıdır. Alaro sayısal hava tahmin modeli çıktılarını kullanan sistem 2018 yılında MGM uzmanları tarafından geliştirilmiştir. Türkiye coğrafyasında meydana gelmesi muhtemel orman yangınlarının 3 gün önceden tahmini kapsayacak şekilde saatlik olarak hazırlanan "Orman Yangını Tehlike Haritaları" Orman Genel Müdürlüğü ile operasyonel olarak paylaşılmaktadır. Orman Yangınları Meteorolojik Erken Uyarı Sistemi arayüzü Şekil 18'de verilmiştir.




***Şekil 18.*** *Orman Yangınları Meteorolojik Erken Uyarı Sistemi (MEUS)*

## 6. Sonuç

Doğa kaynaklı afetlerin büyük bölümünü meteorolojik afetler oluşturmaktadır. Meteorolojik şartlar ile doğrudan ve dolaylı olarak ilişkili olan doğa kaynaklı afetlerin tümü, meteorolojik afetler veya meteorolojik karakterli doğa kaynaklı afet olarak adlandırılır.

Büyük bir coğrafya ve farklı iklim bölgelerine sahip olan ülkemizde afetlere dönüşen çok sayıda ve türde şiddetli meteorolojik olaylar gözlenmektedir. Ülkemizde özellikle son yıllarda, değişen iklim koşullarının da etkisi ile meteorolojik afetlerin oluşum sayıları, etkili oldukları süre ve şiddetlerinin arttığı, daha önce sık görülmeyen bazı afet türlerinin daha fazla meydana gelmeye başladığı görülmektedir. Özellikle 2000'li yılların başından itibaren meteorolojik afetlerin oluşum sayılarında belirgin bir artış gözlemlenmektedir.

Ülkemizde ise en sık görülen meteorolojik karakterli doğal afetler; dolu, sel, taşkın, don, orman yangınları, kuraklık, şiddetli yağış, kuvvetli rüzgâr ve fırtına, yıldırım, çığ ve kuvvetli kardır.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan tahmin ve erken uyarılarla yetkililerin ve vatandaşlarımızın aldıkları önlemler sayesinde meteorolojik karakterli doğal afetlerin neden olabileceği can ve mal kayıplarının azaltılması mümkün olabilmektedir.

Kuvvetli meteorolojik olayların yol açacağı olumsuzlukların en aza indirilmesi ve ilgili kurumlar tarafından gerekli önlemlerin zamanında alınabilmesi amacıyla erken uyarılar hazırlanmakta olup bu uyarıların daha etkin bir şekilde vatandaşlara iletilmesi ve meteorolojik okuryazarlığın arttırılmasına yönelik çalışmalara ihtiyaç vardır. Ayrıca kentlerin planlanmasında tüm paydaşlarca ekstrem meteorolojik eşik değerlerin kullanılması afetlerin olası etkilerini azaltmada önemli bir araç olacaktır.

## 7. Kaynaklar / References

Anderson, E. A. (2006). *Snow accumulation and ablation model-SNOW-17.* US National Weather Service, Silver Spring, MD.

Bartholmes, J. C., Thielen, J., Ramos, M. H., & Gentilini, S. (2009). The european flood alert system EFAS – Part 2: Statistical skill assessment of probabilistic and deterministic operational forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences*, *13*(2), 141–153. https://doi.org/10.5194/hess-13-141-2009

Bocquet, M., Elbern, H., Eskes, H., Hirtl, M., Žabkar, R., Carmichael, G. R., Flemming, J., Inness, A., Pagowski, M., Pérez Camaño, J. L., Saide, P. E., San Jose, R., Sofiev, M., Vira, J., Baklanov, A., Carnevale, C., Grell, G., & Seigneur, C. (2015). Data assimilation in atmospheric chemistry models: Current status and future prospects for coupled chemistry meteorology models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *15*(10), 5325–5358. https://doi.org/10.5194/acp-15-5325-2015

Ernst, B., Oakleaf, B., Ahlstrom, M., Lange, M., Moehrlen, C., Lange, B., & Rohrig, K. (2007). Predicting the Wind. *IEEE Power and Energy Magazine*, *5*(99), x5-78. https://doi.org/10.1109/mpae.2007.4317489

Fuka, D. R., Walter, M. T., MacAlister, C., Degaetano, A. T., Steenhuis, T. S., & Easton, Z. M. (2014). Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*, *28*(22), 5613–5623. https://doi.org/10.1002/hyp.10073

Georgakakos, K. P. (2006). Analytical results for operational flash flood guidance. *Journal of Hydrology*, *317*(1-2), 81–103. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.05.009

IPCC. (2021). *Climate change widespread, rapid, and intensifying – IPCC.* Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/

K. Ajami, N., Gupta, H., Wagener, T., & Sorooshian, S. (2004). Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. *Journal of Hydrology*, *298*(1-4), 112–135. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.033

Kabaoğlu Hatice, UÇAR, E., & DURAN, F. (2020). Buzlanma Tahmini Yapan Mobil Uygulama Geliştirilmesi. *Journal of Polytechnic*, *24*(4), 1543–1555. https://doi.org/10.2339/politeknik.735408

Kadıoğlu, M. (2008). *Sel, Heyelan ve Çığ Đçin Risk Yönetimi*. https://eskisakarya.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/3941.pdf

Kadıoğlu, M. (2012). *Türkiye'de İklim Değişikliği Risk Yönetimi*. Ankara, Türkiye. Türkiye'nin İklim Değişikliği II. Ulusal Bildiriminin Hazırlanması Projesi Yayını.

Kim, S., Shen, H., Noh, S., Seo, D.-J., Welles, E., Pelgrim, E., Weerts, A., Lyons, E., & Philips, B. (2021). High-resolution modeling and prediction of urban floods using WRF-Hydro and data assimilation. *Journal of Hydrology*, *598*, 126236. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126236

Lara-Fanego, V., Ruiz-Arias, J. A., Pozo-Vázquez, D., Santos-Alamillos, F. J., & Tovar-Pescador, J. (2012). Evaluation of the WRF model solar irradiance forecasts in Andalusia (southern Spain). *Solar Energy*, *86*(8), 2200–2217. https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.02.014

MGM. (2015). *Black Sea and Middle East Flash Flood Guidance System User Guide*. Ankara, Türkiye. Turkish State Meteorological Service.

MGM. (2020). *2019 Yılı Meteorolojik Afetler Değerlendirmesi.* T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü.

MGM. (2022a). *2021 Yılı İklim Değerlendirmesi*. Ankara, Türkiye. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü. https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/yillikiklim/2021-iklim-raporu.pdf

MGM. (2022b). *2021 Yılı Yağış Değerlendirmesi*. Ankara, Türkiye. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü. https://www.mgm.gov.tr/FILES/arastirma/yagis-degerlendirme/2021yagisdegerlendirmesi.pdf

MGM. (2022c). *Türkiye Meteorolojik Afetler Değerlendirmesi (2010-2021) Raporu*. Ankara, Türkiye. T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Meteoroloji Genel Müdürlüğü.

Min, M., Bai, C., Guo, J., Sun, F., Liu, C., Wang, F., Xu, H., Tang, S., Li, B., Di Di, Dong, L., & Li, J. (2019). Estimating Summertime Precipitation from Himawari-8 and Global Forecast System Based on Machine Learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *57*(5), 2557–2570. https://doi.org/10.1109/tgrs.2018.2874950

Palmer, T. N. (2012). Towards the probabilistic Earth-system simulator: A vision for the future of climate and weather prediction. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *138*(665), 841–861. https://doi.org/10.1002/qj.1923

Reichle, R. H. (2008). Data assimilation methods in the Earth sciences. *Advances in Water Resources*, *31*(11), 1411–1418. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2008.01.001

Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Liu, Z., Berner, J., & … & Huang, X. Y. (2019). *A description of the advanced research WRF model version 4*. https://opensky.ucar.edu/islandora/object/technotes:576/datastream/pdf/download/citation.pdf

Uzun, M., Babagiray, S., Akbaş, A. İ., Yorulmaz, Ö., Soylu, M., Yılmaz, Ö., & & Altın, O. (Eds.) (2018). *Orman ve Su İşleri Bakanlığı bünyesinde kurulan Taşkın Tahmini ve Erken Uyarı Merkezi (TATUM) çalışmaları.*https://www.researchgate.net/profile/salihbabagiray/publication/343097787_orman_ve_su_ısleri_bakanligi_bunyesinde_kurulan_taskin_tahmini_ve_erken_uyari_merkezi_tatum_calismalari/links/5f16963e299bf1e548c8dd3d/orman-ve-su-ısleri-bakanligi-buenyesinde-kurulan-taskin-tahmini-ve-erken-uyari-merkezi-tatum-calismalari.pdf

WMO (Ed.) (2007). *Resolution 21 (Cg-XV). Strategy for the enhancement of cooperation between national meteorological and national hydrological services for improved flood forecasting*. Final Report of Fifteenth World Meteorological Congrees. https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5225#page=212

WMO. (2015). *Global Observing System*. https://public.wmo.int/en/programmes/global-observing-system

WMO. (2020). *2020 State of Climate Services Report.* WMO.

WMO. (2022). *Flash Flood Guidance System (FFGS) with Global Coverage.* World Meteorological Organization. https://community.wmo.int/hydrology-and-water-resources/flash-flood-guidance-system-ffgs-global-coverage

Yang, F., Pan, H.-L., Krueger, S. K., Moorthi, S., & Lord, S. J. (2006). Evaluation of the NCEP Global Forecast System at the ARM SGP Site. *Monthly Weather Review*, *134*(12), 3668–3690. https://doi.org/10.1175/MWR3264.1

## Yazar Hakkında / About Author

**Dr. Hakan DOĞAN | Meteoroloji Genel Müdürlüğü |**
**hadogan[at]mgm.gov.tr | ORCID: 0000-0003-3505-5864**

Dr. Hakan DOĞAN 1977 yılında doğdu. 1995 yılında Anadolu Meteoroloji Meslek Lisesi'nden mezun olduktan sonra Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nde istidlalci olarak göreve başladı. 2000 yılında Çukurova Üniversitesi'nden Ziraat Mühendisi olarak mezun olan Dr. Hakan DOĞAN, 2004 yılında yüksek lisansını yaptı. 2016 yılında aynı üniversiteden doktora derecesini aldı. Ayrıca ileri hava tahminleri, orman yangınları ile mücadele, tarımsal meteoroloji, iklim değişikliği, sel ve kuraklık yönetimi ve kalite yönetim sistemleri konularında kısa süreli eğitimlere katıldı. Adana, Gaziantep ve Mersin'de mühendis, ekip şefi ve müdür olarak hizmetlerde bulunan Dr. Hakan DOĞAN halen Meteoroloji Genel Müdürlüğü Araştırma Dairesi Başkanı olarak görev yapmakta olup zirai meteorolojik uygulamalar ve uzaktan algılama sistemleri üzerine çalışmalar sürdürmektedir. İyi derecede İngilizce bilen Dr. Hakan DOĞAN evli ve iki çocuk babasıdır.

**Dr. Hakan DOĞAN | Turkish State Meteorological Service |**
**hadogan[at]mgm.gov.tr | ORCID: 0000-0003-3505-5864**

Dr. Hakan DOĞAN was born in 1977. After graduating from Meteorological Technical High School in 1995, he started to work as an forecaster at Turkish State Meteorological Service. After graduating from Çukurova University as an Agricultural Engineer in 2000, Dr. Hakan DOĞAN completed his master degree in 2004. In 2016, he received his Ph.D. degree from the same university. He also attended short-term trainings on advanced weather forecasting, combating forest fires, agricultural meteorology, climate change, flood and drought management and quality management systems. Having served as an engineer, team chief and manager in Adana, Gaziantep and Mersin, Dr. Hakan DOĞAN still works as the Head of the Research Department of Turkish State Meteorological Service and continues to work on agricultural meteorological applications and remote sensing systems. Fluent in English, Dr. Hakan DOĞAN is married and has two children.

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN TÜRKİYE YERALTISUYU KAYNAKLARINA ETKİSİ

# THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON GROUNDWATER RESOURCES IN TÜRKİYE

*Alper BABA*

*Nilüfer TİROL*

 DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch06

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN TÜRKİYE YERALTISUYU KAYNAKLARINA ETKİSİ

***Alper BABA***
*İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü*

***Nilüfer TİROL***
*İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü*

**Özet**

Günümüzde yeraltısuyu, küresel su çekimlerinin yaklaşık üçte birinin kaynağıdır ve dünya nüfusunun büyük bir kısmına içme suyu sağlamaktadır. Atmosferik koşullara karşı daha korunaklı olduğu için yeraltısuyu kaynakları yerüstü su kaynaklarına nazaran daha güvenilir bir kaynak olarak kabul edilir. İklim değişikliği, su kaynaklarının temini ve yönetimine ilişkin belirsizlikler oluşturmaktadır. İklimin iki temel unsuru sıcaklık ve yağış trendi, bölgesel kuraklıkları, taşkın sıklığı ve şiddetini, yüzeysel akış miktarlarını etkilerken nihai olarak yeraltısularının beslenme ve deşarj mekanizmaları da bu değişimlerden etkilenir. İklim değişikliğinin yarattığı etkilere karşı en savunmasız ülkelerden birisi Türkiye'dir. Ülkenin ortalama hava sıcaklığı 1990'lardan beri sürekli artış eğilimindedir ve yağış rejimleri değişmektedir. İklim etkenleri, nüfus artışı, tarımsal ve endüstriyel aktivitelerin artması, ruhsatsız kuyular yeraltısuları arz ve talebi üzerinde değişiklikler yaratmaktadır. Türkiye'de tarımsal amaçlı yeraltısularının kullanımı her sene daha da artmaktadır ve günümüzde bu oran %67'dir. Geçmişten günümüze su seviyeleri incelendiğinde, yeraltısuyu kaynakları çoğu bölgede azalma hatta bazı bölgelerde tükenme sorunu ile karşı karşıyadır. Özellikle, Marmara, Ege, İç Anadolu ve Güney Doğu Anadolu bölgelerinde yeraltısuyu seviyeleri bazı kuyularda 100 metreye kadar düşmüştür. Bu azalış eğiliminin devamı, evsel, endüstriyel ve tarımsal sulama için önemli bir kaynak olan ve kurak dönemlerde akarsuları besleyerek ekosistemin devamlılığını sağlayan akiferler için geri döndürülemez sorunlara yol açabilir. Ayrıca gelecek için yapılan öngörüler, iklim değişikliği ve artan su talepleri nedeniyle Türkiye'nin birçok yerinde su stresinin daha da artacağını ortaya koymaktadır. Bu nedenle, yeraltısularının mevcut durumunu değerlendirmek ve iklim değişikliğinin yaratacağı etkileri tahmin ederek su yönetim politikaları geliştirmek su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı için büyük önem taşımaktadır. Bu makale, iklim değişikliği ve Türkiye'nin yeraltısularının mevcut durumu hakkında genel bir çerçeve sunmaktadır.

***Anahtar Kelimeler***
*Yeraltısuyu kaynakları, İklim değişikliği, Su stresi, Türkiye*

# THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON GROUNDWATER RESOURCES IN TÜRKİYE

***Alper Baba***
*İzmir Institute of Technology*

***Nilüfer Tirol***
*İzmir Institute of Technology*

**Abstract**

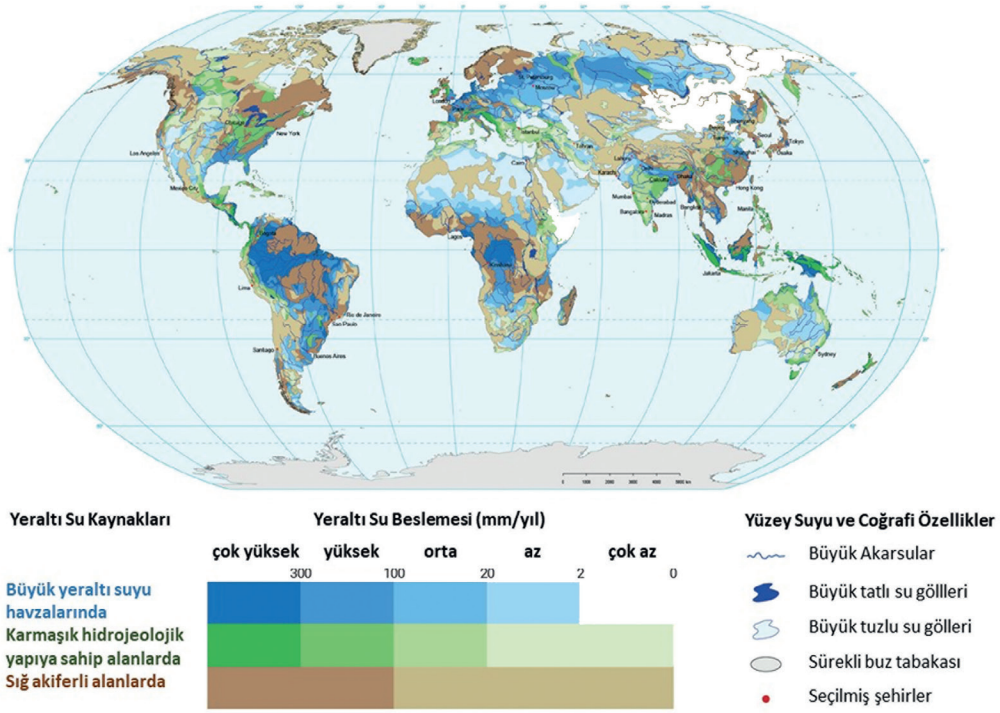
Today, groundwater is the source of about a third of global water withdrawals and provides drinking water to a large proportion of the world's population. Groundwater resources are considered a more reliable source than surface water resources, as they are more protected against atmospheric conditions. Climate change creates uncertainties regarding the supply and management of water resources. While the two basic elements of the climate the temperature and precipitation trend affect the regional droughts, the frequency, and severity of floods, the amount of surface runoff, and the recharge and discharge mechanisms of groundwater are also affected by these changes. Türkiye is one of the most vulnerable countries to the effects of climate change. The country's average air temperature tends to increase continuously since the 1990s, and precipitation regimes are changing. Climate factors, population growth, increase in agricultural and industrial activities, and unlicensed wells create changes in groundwater supply and demand. The use of groundwater for agricultural purposes in Türkiye is increasing every year and today this rate is 67%. When the groundwater levels are examined from past to present, these resources are faced with the problem of decrease in most regions and even depletion in some regions. In particular, in the Marmara, Aegean, Central Anatolia, and Southeastern Anatolia regions, the groundwater levels have decreased about 100 meters. The continuation of this trend may cause irreversible problems for aquifers, which are an important source for domestic, industrial, and agricultural irrigation and provide the continuity of the ecosystem by feeding the streams in dry periods. In addition, projections for the future reveal that water stress will increase in many parts of Türkiye due to climate change and increasing water demands. For this reason, it is of great importance for the sustainable use of water resources to evaluate the current situation of groundwater and to develop water management policies by predicting the effects of climate change. This article provides a general framework on climate change and the current state of Türkiye's groundwater.

***Keywords***
*Groundwater resources, Climate change, Water stress, Türkiye*

## 1. Giriş

Su, dünyada en bol bulunan bileşiklerden birisi olmasına rağmen su kaynaklarının çoğunluğunu tuzlu sular oluşturur. Küresel tatlı su hacmi 10.6 milyon km³ olarak tahmin edilmekle birlikte bu değer dünya üzerindeki tüm suyun %1'inden azına tekabül etmektedir (Shiklomanov & Rodda, 2003). Bu hacmin ise yaklaşık %99'u yeraltısuyu kaynaklarından oluşur. Yeraltısuyu kaynakları, evsel, endüstriyel ve tarımsal su taleplerinin büyük bir kısmını karşılayan kritik tatlı su kaynaklarındandır (Döll, 2009; Okkonen vd., 2010). Teknolojik gelişmelerin etkisiyle (özellikle verimli pompaların kullanımı ve kırsal alanların elektrifikasyonu) küresel yeraltısuyu çekim miktarında artış yaşanmıştır. Küresel çapta yeraltısuyu çekimi 1960'larda yılda 312 km³ iken 2000'de 743 km³'e ve 2017'de 959 km³'e yükselmiştir (Wada vd., 2010; UN WWDR, 2022).

Şekil 1'de küresel ölçekte yeraltısuyu kaynaklarının dağılımı gösterilmektedir. Mavi renk büyük yeraltısuyu havzalarını, yeşil renk karmaşık hidrojeolojik yapıya sahip alanları ve kahverengi renk yeraltısuyu gelişimi için daha az elverişli alanları temsil etmektedir. Mavi ile temsil edilen alanlar dünyada depolanan tüm tatlı yeraltısuyunun en büyük payını içerirken aynı zamanda yeraltısuyunun çıkarılması için en uygun koşulları da sunarlar. Yeşil ile temsil edilen alanlarda yeraltısuyu genellikle çatlaklı jeolojik birimlerde depolanır. Bu kaynakların üretkenliği, büyük yeraltısuyu havzalarından daha az olma eğilimindedir.




***Şekil 1.*** *Küresel yeraltısuyu kaynakları (URL-1: BGR/UNESCO; 2008).*

Atmosferdeki kısa vadeli değişkenlikten korunduğu için, yeraltısuyu genellikle istikrarlı ve güvenilir bir kaynak olarak kabul edilir. Su stresi yaşayan ve büyük akifer sistemleri olan bölgelerde, yeraltısuyu genellikle ek su kaynağı olarak kullanılmaktadır. Her ne kadar oranlar bölgelere ve sahip oldukları iklimsel özelliklere göre değişse de yeraltısuyu kaynaklarının sulama amaçlı kullanım amacı genellikle toplam yeraltısuyu tüketiminin %60-70'ini oluşturmaktadır (Jakeman vd., 2016; Amanambu vd., 2020). Artan nüfusun ihtiyacını karşılamak için yeraltısularından yapılan aşırı çekimler, kalıcı olarak yeraltı su seviyelerinin hızla azalmasına ve hatta tükenmesine yol açabilir. (Gleeson vd., 2010). Ayrıca, yeraltısuyu seviyelerinin düşmesi, yerüstü su kaynakları ile doğrudan ilişkisi nedeniyle yeraltısuyuyla beslenen ekosistemler üzerinde de yıkıcı etkilere sahip olabilir.

Tatlı su hacmi, kıtalar arasında düzensiz bir şekilde dağılmıştır; bu düzensizlik kıtaların büyüklüğündeki ve birim alan başına ortalama tatlı su hacmindeki farklılıklarla açıklanmaktadır. Tablo 1'de, kıtalara göre 2017 yılındaki yeraltısuyu çekim tahminleri gösterilmektedir. Bu tabloya göre, 2017 yılında toplam küresel yeraltısuyu çekimi, dünya genelinde eşit olmayan bir şekilde dağılmış olarak yaklaşık 959 $km^3$ olmuştur. Asya kıtasındaki çekimler bu miktarın yaklaşık üçte ikisine tekabül etmektedir. Asya kıtasını, Kuzey Amerika %16'lık payıyla takip etmektedir. Ülkesel bazda incelendiğinde de bu durum kanıtlanmaktadır. Küresel yeraltısuyu çekiminde en yüksek paya sahip on ülkeden sekizi Asya kıtasında (Hindistan, Çin, Pakistan, İran, Endonezya, Bangladeş, Suudi Arabistan ve Türkiye) ve ikisi Kuzey Amerika'da (ABD ve Meksika) bulunmaktadır. Yeraltısuyu kaynaklarının artan kullanımı nedeniyle, dünya çapında yeraltısuyu kaynaklarının 1900'den 2008 yılına kadar 4500 $km^3$ azaldığı tahmin edilmektedir (Frappart & Ramillien, 2018). Su talebini karşılamada bölgesel farklılıklar etkin rol oynadığı için dünyanın birçok yerinde ülkeler su stresi ile karşı karşıyadır. Günümüzde 2 milyardan fazla insanın (dünya nüfusunun %35'i) şiddetli su stresinden muzdarip olduğu tahmin edilmektedir (Alcamo vd., 2000).

*Tablo 1: 2017 yılındaki yeraltısuyu çekimleri (UN WWDR, 2022).*

| **Kıta** | **Yeraltısuyu Çekimi ($km^3$ / yıl)** | **Toplam tatlı su çekimindeki yüzdesi (%)** |
|---|---|---|
| Kuzey Amerika | 156.6 | 16 |
| Güney Amerika | 27.3 | ~3 |
| Avrupa | 64.8 | ~7 |
| Afrika | 45.4 | ~5 |
| Asya | 656.7 | 68 |
| Avustralya ve Okyanusya | 8.1 | ~1 |
| **Dünya** | **958.9** | **100** |

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), iklimi "belirli bir zaman aralığı ve belirli bir alan üzerindeki ortalama hava durumu" olarak tanımlar. Onlarca yıl veya daha uzun süren değişkenlik ise, iklim değişikliği olarak adlandırılır. Yapılan birçok çalışma, bugün küresel olarak yaşadığımız bu değişimin insan aktiviteleri kaynaklı olduğunu belirtmektedir. Atmosferdeki karbondioksit seviyeleri 1950'lerden beri sürekli olarak artış eğilimindedir. Karbondioksit artışı ile birlikte artan sıcaklıklar hidrolojik döngü üzerinde de birçok etkiye neden olmaktadır. Ayrıca, çeşitli önlemler alınsa dahi küresel ısınma ve yaratacağı değişimlerin onlarca yıl daha devam edeceği konusunda fikir birliği vardır (Trenberth vd., 2006; IPCC, 2007)

İklim koşulları, hidrolojik sistemleri hem doğrudan hem de dolaylı olarak etkiler. İklimin iki temel unsuru sıcaklık ve yağış trendi, bölgesel kuraklık ve taşkın sıklığı ve şiddetini, yüzeysel akış miktarlarını, yeraltısularının beslenme ve boşalım miktarını etkiler (Alley, 2001; Cuthbert vd., 2019). Gözlemsel veriler ve iklim tahminleri, tatlı su kaynaklarının hassas olduğuna ve toplum ve ekosistemler için geniş kapsamlı sonuçları olan iklim değişikliğinden güçlü bir şekilde etkilenme potansiyeline sahip olduğuna dair çok miktarda kanıt sağlamaktadır (Bates vd., 2008). Bugün iklim değişikliği, küresel olarak su kıtlığında öngörülen artışların yaklaşık %20'sinden sorumlu tutulmaktadır (Sophocleous, 2004).

Sıcaklıktaki artış buharlaşmanın artmasına neden olmakta ve hem yerüstü hem de yeraltısularının buharlaşma miktarı artmaktadır. Sıcaklık artışları devam ettikçe, su kaynakları üzerindeki baskıların da katlanarak artacağı belirtilmektedir (Loáiciga 1996; Milly vd., 2005; Holman 2006; IPCC 2007). İklim değişikliği, öncelikli olarak yerüstü su kaynaklarının kalite ve miktarında etkilere yol açsa da nihai olarak yeraltısuyu sistemleri de bu değişikliklerden etkilenir.

Yeraltısuyu beslenimi, yer altı rejimlerinin sürdürülebilirliği ve hidrolojik dengesi için ana belirleyici faktörlerden birisidir (Döll & Fiedler, 2008; Thampi & Raneesh, 2012). Bu süreç, yağışla birlikte başlar ve yüzeye biriken su kütleleri zaman içerisinde akiferlere sızar. Yağış, sıcaklık ve buharlaşma gibi atmosferik süreçler tarafından kontrol edildiği için iklimde yaşanan değişiklikler yeraltısuyu beslenme miktarını etkiler (Bates vd., 2008; Franssen, 2009; Cuthbert vd., 2019; Kumar, 2012; Amanambu vd., 2020; Chambel, 2015; Sowers vd., 2011). Yeraltısuları etkileşimde olduğu yerüstü su kaynaklarından, bölgenin fiziki ve demografik yapısından ayrı olarak düşünülmemeli ve hidrolojik döngüyü etkileyecek bütün unsurlar bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır.

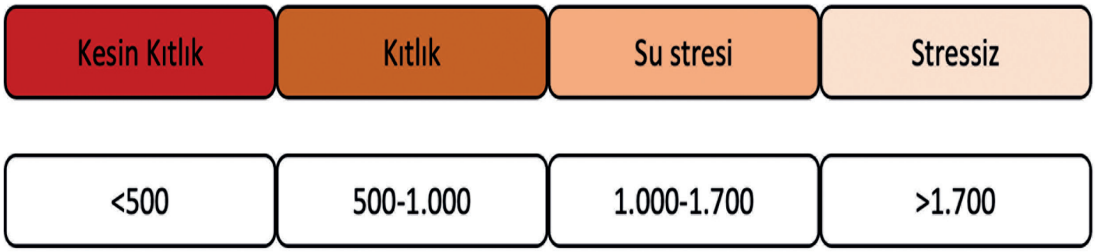
Su kaynaklarının iklim değişikliğine nasıl tepki verebileceğini daha iyi anlamak için son yıllarda çok sayıda bilimsel araştırma yapılmıştır. Ancak, bu çalışmalar görünürlükleri ve erişilebilirlikleri nedeniyle ağırlıklı olarak yerüstü su sistemlerine odaklanmıştır (Amanambu vd., 2020; Kumar, 2012; Patil vd., 2020). İklim değişikliğinin yeraltısuyu kaynakları üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi yerüstü sularına göre daha karmaşıktır. Değerlendirme için genellikle sayısal modeller ve veri korelasyon yöntemleri kullanılır. Sayısal modeller, toprak altı karakterizasyonunu, akifer sistemi kavramsal modelini, sınır koşullarını ve yeniden beslenme

ve çekim oranlarını içerir. Öte yandan, yeraltısuyu yönetimi için de bir karar verme aracı olarak sıklıkla kullanılan jeoistatistik, yeraltısuyu depolama, rezervuar kapasitesi, yeraltısuyu seviyesi dalgalanması ve yeraltısuyu kaynaklarının kalitesinin belirlenmesini sağlar (Uyan & Çay, 2013; Xiao vd., 2016). Yeraltısuyu kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için uzun vadede yaşanabilecek tüm değişimlerin değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

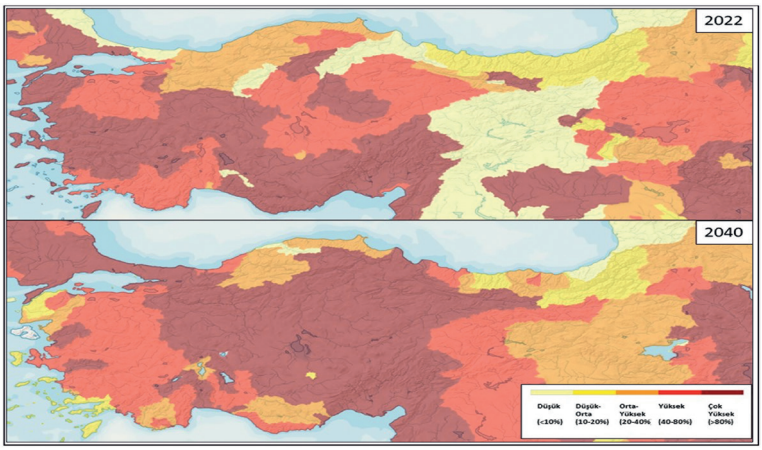
## 2. Türkiye ve Su Stresi

Yıllık ortalama yağışın 574 mm olduğu Türkiye'de kullanılabilir yerüstü suyu miktarı 94 milyar $m^3$ iken kullanılabilir yeraltısuyu miktarı 18 milyar $m^3$'tür. Türkiye'de stratejik bir kaynak olan yeraltısuları içme-kullanma, tarımsal sulama ve endüstriyel amaçlarla kullanılmaktadır. Nüfus artışına bağlı olarak su tüketimi sürekli artmaktadır. Su ihtiyacını karşılamak için yeraltısularından kaynaklanan aşırı çekimler, yeraltısuyu seviyesinde önemli düşüşlere neden olabilmektedir. Ülkelerin su kaynaklarını değerlendirmede önemli bir gösterge kişi başına düşen kullanılabilir yıllık su miktarı bir diğer deyişle Falkenmark Göstergesi'dir (Ş*ekil 2*). Ev, tarım, sanayi ve enerji sektörlerindeki su gereksinimlerine ve çevrenin ihtiyaçlarına ilişkin tahminlere dayanarak, Falkenmark vd., (1989) bir ülkenin su stresi yaşamaması için eşik değerin yılda kişi başına 1700 $m^3$ yenilenebilir su kaynağı olduğunu önerdiler.

Türkiye'de kişi başına düşen su miktarı, artan nüfus ve değişen iklim koşullarına bağlı olarak yıllar içerisinde sürekli olarak azalma eğilimi göstermiştir. Örneğin 2000 yılında kişi başına düşen kullanılabilir su miktarı 1652 $m^3$ iken bu değer 2020 yılında yaklaşık 300 $m^3$ azalarak 1346 $m^3$'e düşmüştür. Şekil 3'te Türkiye'nin günümüz ve 2040 yılındaki su stresi haritaları görülmektedir. 2040 yılındaki harita bugünkü mevcut koşulların aynı şekilde devam edeceği senaryo için üretilmiştir. 2022 tarihli harita incelendiğinde görülmektedir ki özellikle Marmara, Ege, İç Anadolu ve Akdeniz bölgeleri hali hazırda yüksek ve çok yüksek seviyelerde su stresi yaşayan bölgelerdir. İklimsel özellikler, demografik durum (nüfus yoğunluğu), endüstriyel ve tarımsal faaliyetler bu bölgelerin su stresi ile karşı karşıya olmasındaki ana unsurlar olarak değerlendirilebilir. 2040 yılında ise Karadeniz ve Doğu Anadolu bölgeleri dışındaki çoğu bölgede ciddi oranlarda su sorunları yaşanacağı öngörülmektedir.




***Şekil 2.*** *Falkenmark göstergesi ($m^3$/kişi/yıl).*

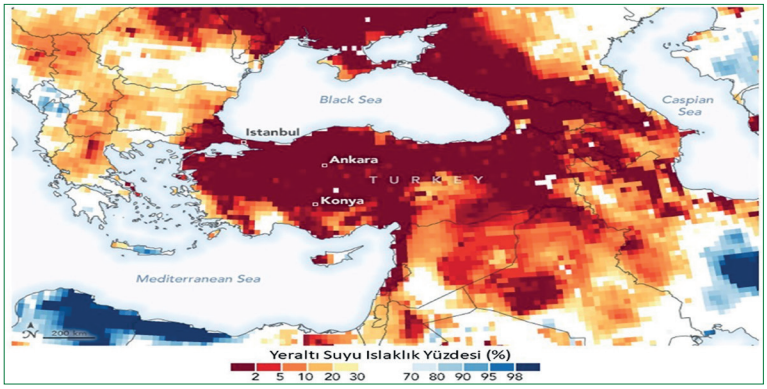



***Şekil 3.*** *Türkiye'nin 2022 ve 2040 yılı su stresi haritaları (URL-4, 2022).*

## 3. Türkiye'de Yeraltısuyunun Mevcut Durumu

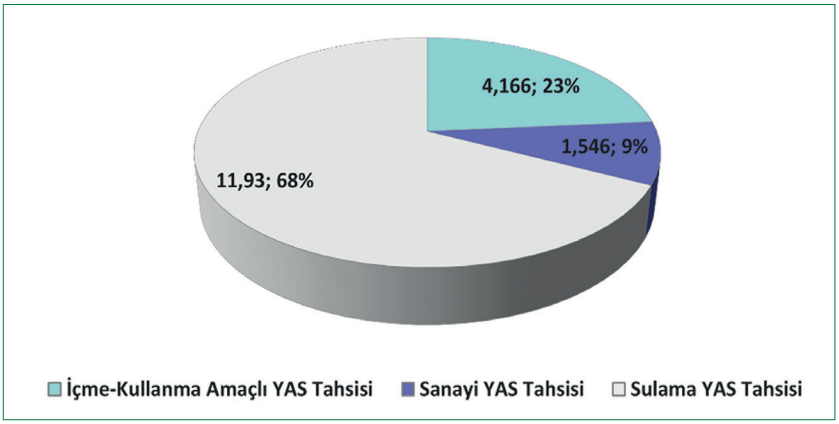
Akdeniz iklim kuşağında yer alan Türkiye, iklim değişikliğinin yarattığı değişikliklere en çok maruz kalan ülkelerden birisidir. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli, 1970'lerden bu yana yağışların azalması nedeniyle Akdeniz iklim kuşağında kuraklığın arttığına ve gelecekte de artmaya devam edeceğine işaret etmektedir (2007; 2021). Yapılan diğer çalışmalar, Türkiye genelinde sıcaklıkların özellikle 1990'lardan sonra sürekli olarak artış eğiliminde olduğunu göstermektedir (Türkeş vd., 1995; Türkeş, 2012; Tayanç vd., 2009; MGM, 2013).

NASA'nın GRACE-FO uydu verilerinden ve çeşitli sayısal modellerden yararlanarak oluşturduğu yeraltısuyu ıslaklığı haritalarında da bu durum net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Şekil 4, 1948-2010 arası dönemdeki uzun süreli ortalamalar ile 2021 yılı Ocak ayının karşılaştırılmasını göstermektedir. Mavi alanlar normalden daha fazla suya sahipken ve turuncu ve kırmızı alanlar daha az suya sahiptir. Yeraltısuyu kaynakları, iklim değişikliği ve insan faaliyetlerinin yarattığı sonuçlar tarafından tehdit edilmektedir. Görüldüğü gibi, akiferlerdeki yeraltısuyu Türkiye'nin geneli için uzun süreli ortalamaların altındadır. Bu durumun devamı, içme suyu ve tarımsal sulama için önemli bir kaynak olan ve kurak dönemlerde akarsuları besleyebilen akiferler için ciddi sorunlar teşkil edebilir.



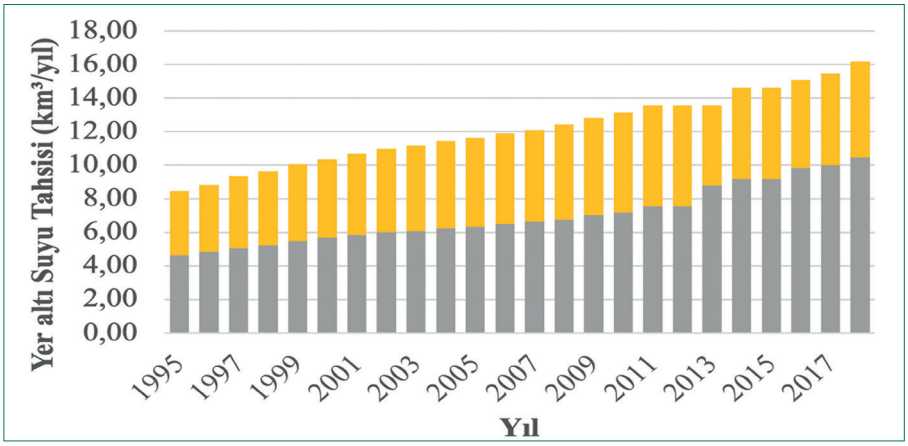

***Şekil 4.*** *Türkiye'nin yeraltısuyu ıslaklık haritası (NASA, 2021).*

Türkiye'de 2018 yılında 61,5 $km^3$ su tüketilmiştir. Bu suyun %71,5'i sulama, %10,7'si evsel, %17,8'i endüstriyel amaçlarla kullanılmıştır. Bunun yaklaşık 16,2 $km^3$'ü yeraltısuyu kaynaklarından karşılanmıştır. 2021 yılında bu değer 17,6 $km^3$'e yükselmiştir. Şekil 5, 2021 yılı için sektörel bazda yeraltısuyu tahsis durumunu göstermektedir. Yeraltısuyu tahsislerinin %68 ile önemli bir kısmını tarım sektörü (sulama) tüketmektedir. Tarım sektörünü %23 ile evsel amaçlı tüketimler takip ederken son sırada %9 ile endüstriyel amaçlı kullanım gelmektedir.



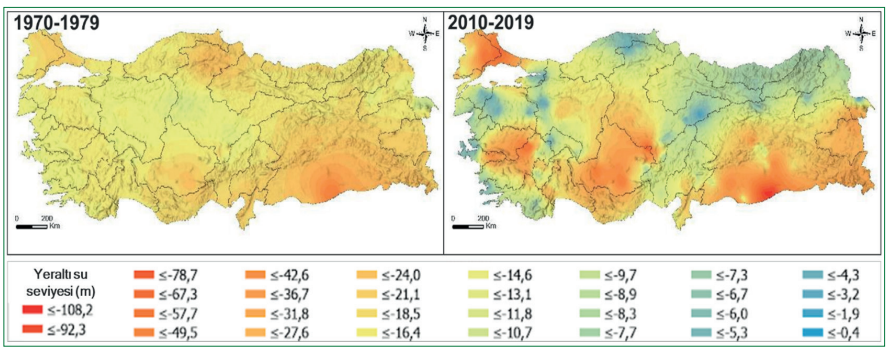

***Şekil 5.*** *Türkiye'de sektörel yeraltısuyu tahsisi 2018 ($km^3$/yıl) (URL-3, 2022).*

Türkiye'de yeraltısuyunun birincil kullanıcısı da tarım sektörüdür (Çakmak vd., 2004). Sulama için kullanılan yeraltısuyu miktarı yıllar içerisinde, artan nüfusun da etkisi ile sürekli olarak artmıştır (Şekil 6). 1995 yılında sulamada kullanılan yeraltısuyunun toplam yeraltısuyu tahsisi içindeki payı %55 civarında iken 2019 yılında bu değer %67'ye yükselmiştir (URL-2, 2020). Ayrıca, iklim değişikliğinin de etkisi ile Akdeniz iklim kuşağında sulama suyu ihtiyacının önümüzdeki dönemlerde bölgesel olarak değişmekle birlikte yüzde 4 ile 18 oranlarında artacağı öngörülmektedir (Galeotti, 2020).



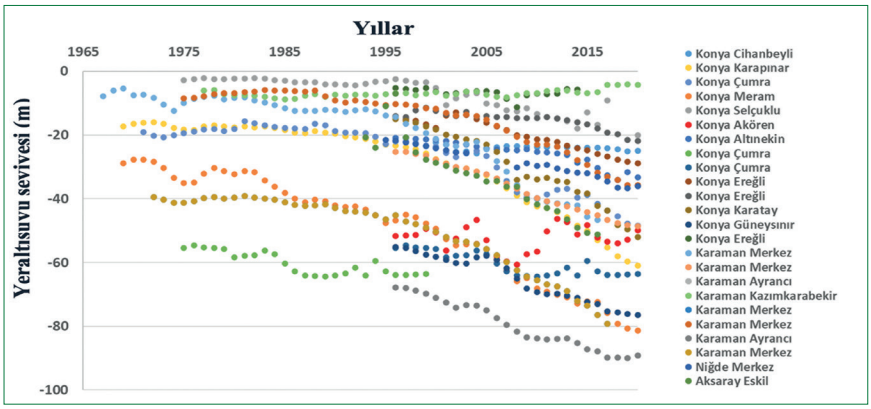

***Şekil 6.*** *Türkiye'de 1995-2019 yılları arası yeraltısuyu tahsisleri (URL-2, 2020).*
*(Sarı renk evsel ve endüstriyel kaynaklı tahsisleri, gri renk tarımsal tahsisleri göstermektedir.)*

Türkiye'nin yeraltısuyu seviyelerinin zamansal değişimleri Şekil 7'de verilmiştir. Çalışmada, 1970-2019 arası toplamda 310 kuyu verisi incelenmiştir. Özellikle Marmara, Ege, İç Anadolu ve Güney Doğu Anadolu Bölgeleri'nde incelenen kuyularda su seviyelerinde 100 metreyi bulan azalmalar gözlemlenmiştir. Yapılan diğer çalışmalar da, Türkiye'nin farklı bölgeleri için yeraltısuyu seviyelerindeki azalma eğilimini destekler niteliktedir (Apaydın, 2010; Arkoç, 2022; Caló vd., 2017; Çelik, 2015; Lenk, 2013; Şimşek vd., 2020; Yagbasan, 2016).




***Şekil 7.*** *Türkiye'nin yeraltısuyu değişim haritaları (1970-1979 ile 2010-2019 dönemlerinin karşılaştırılması) (Tirol ve Baba, 2023, incelemede).*

Devlet Su İşleri (DSİ) envanterinde kayıtlı ve sertifikalı 450 bin kuyu bulunmaktadır. Bu kuyuların yaklaşık 389 bini sulama amaçlı kullanılmakta ve yıllık 11.930 $hm^3$ sulama suyu tüketilmektedir (URL-3, 2022). Ruhsatsız kuyulardan yapılan izinsiz çekimler Türkiye'nin yeraltısuyu kaynaklarını etkileyen en kritik sorunlardan biridir. Ülkede 60 binden fazlası Konya Kapalı Havzası'nda olmak üzere 100 binin üzerinde ruhsatsız kuyu olduğu tahmin edilmektedir (URL-3, 2022). Konya Ovası'nda yeraltısuyunun tükenmesi nedeniyle yer yer toprak çökmeleri (obruklar) meydana gelmiştir (Caló vd., 2017). DSİ envanterinden alınan ve Konya Havzası'nda bulunan bazı kuyuların zaman içerisindeki yeraltısuyu seviyesi değişimleri Şekil 8'de verilmiştir. Özellikle 2000'li yılların başlarından itibaren bu bölgedeki yeraltısuyu seviyeleri sürekli olarak düşüş eğilimi göstermiştir.




***Şekil 8.*** *Konya Havzası'nda bulunan kuyuların yıllar içerisinde yaşadığı su seviye değişimleri (Tirol ve Baba, 2022, incelemede).*

## 4. Sonuç

Yeraltısuyu kaynakları, insan tüketiminin her alanında ihtiyaç duyulan doğal kaynaklar arasında yer almaktadır. Yeraltısuyu kaynakları sadece su temin edilmesi açısından değil, aynı zamanda yerüstü suyunun miktar ve kalite değişkenliğine karşı depo ve tampon görevi görmesi nedeniyle özellikle kurak dönemlerde yerüstü sularını beslemesi açısından da değerlidir. Yağışlardaki bölgesel değişiklikler ve sıcaklıktaki artış, su kaynaklarının miktar ve kalitesinde değişikliklere neden olur. Ayrıca nüfus artışı ve beraberinde artan su talebi, su kaynakları üzerinde ek baskıya neden olmaktadır. Türkiye'de yeraltısuyu seviyelerindeki değişimleri belirlemek için yapılan çalışmalar yeraltısuyu seviyelerinin azalma eğiliminde olduklarını göstermektedir. Özellikle tarımsal üretimin yüksek olduğu ve nüfusun yoğunlaştığı bölgelerde bu düşüş daha hızlı ve daha fazla gerçekleşmektedir.

Türkiye'de yeraltısuyu kaynaklarının yaklaşık üçte ikisini tahsis eden tarım sektöründe verimli su kullanımı öncelikli hedef olmalıdır. Son yıllarda kuyulara su sayaçlarının takılması ve verimli sulama teknolojilerinin benimsenmesi ile birlikte suyun sürdürülebilir kullanımında gelişmeler yaşanmıştır. Su kaynaklarının daha verimli kullanılması için her sektörde çalışmalara hız verilmesi gerekmektedir. Çiftçilerin suyu daha verimli kullanan uygulamalar konusunda bilgilendirildiği eğitim ve bilgi paylaşım programları ile su ve maliyet tasarrufu sağlanabilir. Tarımda ve diğer sektörlerde arıtılmış atık su kullanımlarının yaygınlaştırılması ile daha fazla tatlı su kaynağı oluşturulabilir. Ayrıca arıtılmış sular, yeraltısuyu rezervinin arttırılması için de kullanılabilir. Su kaynaklarının etkin yönetimi için su politikalarının da gözden geçirilmesi gerekmektedir. Su kaynakları yöneticileri ve politikacılar, su taleplerinin karşılanmasında yeraltısuyu kaynaklarının önemini daha iyi kavramalıdır. Gelecekteki su stratejileri, değişen iklim koşullarına uyum sağlayabilecek ve etkileri en aza indirebilecek çözümlere ihtiyaç duyacaktır. Yeraltısuyu kaynaklarının etkin kullanımını artırmak için öneriler ayrıca aşağıda özet olarak listelenmiştir:

- Entegre su yönetim kavramının geliştirilmesi ve yaygınlaştırılması,
- Yerlatısuyu gözlem noktalarının fazlalaştırılması ve gözlem ağının genişletilmesi,
- Çekimlerin ölçüm sistemleri ile kontrol altına alınması,
- Akiferlere beslenimleri arttıracak yöntemlerin geliştirilmesi,
- Yeni yasal düzenlemeler ile kontrolsüz ve izinsiz kuyuların önlenmesi ve aşırı çekimlerin caydırılması,
- Su kayıplarının azaltılması,
- Su arz ve talep dengesinin öngörülmesi ve etkin yönetimi,
- Kirlenmiş su kaynaklarının arıtımı, yeniden kullanımı,
- Kurumlar arası koordinasyonun iyileştirilmesi,
- Halkın bu konularda bilinçlendirilmesi ve karar mekanizmalarına katılımlarının sağlanması.

İklim değişikliğinin yeraltısuyu sistemlerini nasıl etkileyebileceğini anlamak, su kaynaklarının sağlam ve uzun vadeli yönetiminin hayati bir bileşenidir. Ancak, iklim değişikliğinin yeraltısuyu sistemlerini nasıl etkileyebileceğini tahmin etmek gelecekteki iklim tahminlerindeki belirsizlikler ve yeraltısuyu beslenmesini, deşarjını ve kalitesini etkileyen karmaşık süreç kombinasyonları nedeniyle zordur. İklim ve yeraltısuyunun ortak davranışları konusundaki anlayışı geliştirmek için meteorolojik ve hidrolojik veriye odaklı araştırmalar yoluyla sorunları önceden belirlemeye çalışmak gerekir. Bölgesel ve kıtasal ölçeklerde veri analizi ve yönetimi, uzaktan algılama ve modellemedeki ilerlemeler belirsizlikleri azaltarak nihayetinde sürdürülebilir, sorumlu yönetim ve bilinçli planlama için umut vericidir. Bu analizler sonucunda geliştirilen uyum stratejileri mevcut politikalara entegre edilerek yeraltısuyu kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi sağlanabilir. Hızla değişen iklime uyum sağlayabilmek için bu çalışmaların da hız kazanması gerekmektedir.

## 7. Kaynaklar / References


Alcamo, J., Henrichs, T., & Rosch, T. (2000). World water in 2025. *World water series report*, 2.

Alley, W. M. (2001). Ground water and climate. *Ground Water*, 39(2), 161-169.

Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O., ... & Ochege, F. U. (2020). Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, 589, 125163.

Apaydin, A. (2010). Response of groundwater to climate variation: Fluctuations of groundwater level and well yields in the Halacli aquifer (Cankiri, Türkiye). *Environmental Monitoring and Assessment*, 165(1–4), 653–663. https://doi.org/10.1007/s10661-009-0976-8

Arkoc, O. (2022). Modeling of spatiotemporal variations of groundwater levels using different interpolation methods with the aid of GIS, case study from Ergene Basin, Türkiye. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(1), 967–976. https://doi.org/10.1007/s40808-021-01083-x

Bates, B., Kundzewicz, Z., & Wu, S. (2008). Climate change and water. Intergovernmental Panel on Climate Change Secretariat.

Cakmak, B., Unver, I. O., & Akuzum, T. (2004). Agricultural water use in Türkiye. *Water international*, 29(2), 257-264.

Caló, F., Notti, D., Galve, J., Abdikan, S., Görüm, T., Pepe, A., & Balik Şanli, F. (2017). DInSAR-Based Detection of Land Subsidence and Correlation with Groundwater Depletion in Konya Plain, Türkiye. *Remote Sensing*, 9(1), 83. https://doi.org/10.3390/rs9010083

Chambel, A. (2015). The role of groundwater in the management of water resources in the World. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 366, 107-108.

Cuthbert, M. O., Gleeson, T., Moosdorf, N., Befus, K. M., Schneider, A., Hartmann, J., & Lehner, B. (2019). Global patterns and dynamics of climate–groundwater interactions. *Nature Climate Change*, 9(2), 137–141. https://doi.org/10.1038/s41558-018-0386-4

Çelik, R. (2015). Temporal changes in the groundwater level in the Upper Tigris Basin, Türkiye, determined by a GIS technique. *Journal of African Earth Sciences*, 107, 134–143. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.03.004

Döll, P. (2009). Vulnerability to the impact of climate change on renewable groundwater resources: a global-scale assessment. *Environmental Research Letters*, 4(3), 035006.

Döll, P., & Fiedler, K. (2008). Global-scale modeling of groundwater recharge. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12(3), 863-885.

Falkenmark, M., Lundqvist, J., & Widstrand, C. (1989, November). Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development. *In Natural resources forum* (Vol. 13, No. 4, pp. 258-267). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

Franssen, H. J. H. (2009). The impact of climate change on groundwater resources. International Journal of Climate Change Strategies and Management.

Frappart, F., & Ramillien, G. (2018). Monitoring groundwater storage changes using the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite mission: A review. In Remote Sensing (Vol. 10, Issue 6). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/rs10060829

Galeotti, M. (2020). The Economic Impacts of Climate Change in the Mediterranean. *Mediterranean Yearbook* (IEMed).

Gleeson, T., VanderSteen, J., Sophocleous, M. A., Taniguchi, M., Alley, W. M., Allen, D. M., & Zhou, Y. (2010). Groundwater sustainability strategies. *Nature Geoscience*, 3(6), 378-379.

Holman, I. P. (2006). Climate change impacts on groundwater recharge-uncertainty, shortcomings, and the way forward?. *Hydrogeology journal*, 14(5), 637-647.

IPCC (2007). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 7-22.

IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Jakemann ̈, A., Randall, O., Huntt ̈, J., & Andrewwross, J.-D. (n.d.). Integrated Groundwater Management Concepts, Approaches and Challenges.

Kumar, C. P. (2012). Climate Change and Its Impact on Groundwater Resources. *In RESEARCH INVENTY: International Journal of Engineering and* Science (Vol. 1, Issue 5). www.researchinventy.com

Lenk, O. (2013). Satellite based estimates of terrestrial water storage variations in Türkiye. *Journal of Geodynamics*, 67, 106–110. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.04.010

Loaiciga, H. A., Valdes, J. B., Vogel, R., Garvey, J., & Schwarz, H. (1996). Global warming and the hydrologic cycle. *Journal of Hydrology*, 174(1-2), 83-127.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) (2013). Akçakaya A, Eskioğlu O, Atay H, Demir Ö. (eds) Yeni Senaryolar ile Türkiye İklim Projeksiyonları ve İklim Değişikliği. Published online 2013:149. https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/IKLIM_DEGISIKLIGI_PROJEKSIYONLARI.pdf

Milly, P. C., Dunne, K. A., & Vecchia, A. V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(7066), 347-350.

NASA, https://nasagrace.unl.edu/, Son Erişim Tarihi: 10 Ekim 2022.

Okkonen, J., Jyrkama, M., & Kløve, B. (2010). A conceptual approach for assessing the impact of climate change on groundwater and related surface waters in cold regions (Finland). *Hydrogeology Journal*, 18(2), 429-439.

Patil, N. S., Chetan, N. L., Nataraja, M., & Suthar, S. (2020). Climate change scenarios and its effect on groundwater level in the Hiranyakeshi watershed. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100323. https://doi.org/10.1016/J.GSD.2019.100323

Shiklomanov, I. A. and Rodda, J. 2003. World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century. Cambridge, UK: Cambridge University Press

Sophocleous, M. (2004). Global and regional water availability and demand: prospects for the future. *Natural Resources Research*, 13(2), 61-75.

Sowers, J., Vengosh, A., & Weinthal, E. (2011). Climate change, water resources, and the politics of adaptation in the Middle East and North Africa. *Climatic Change*, 104(3), 599-627.

Şimşek, C., Demirkesen, A. C., Baba, A., Kumanlıoğlu, A., Durukan, S., Aksoy, N., Demirkıran, Z., Hasözbek, A., Murathan, A., & Tayfur, G. (2020). Estimation groundwater total recharge and discharge using GIS-integrated water level fluctuation method: a case study from the Alaşehir alluvial aquifer Western Anatolia, Türkiye. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(3), 143. https://doi.org/10.1007/s12517-020-5062-0

Tayanç, M., Im, U., Doğruel, M., & Karaca, M. (2009). Climate change in Türkiye for the last half century. *Clim Change*, 94(3-4), 483-502. doi:10.1007/s10584-008-9511-0

Thampi, S. G., & Raneesh, K. Y. (2012). Impact of anticipated climate change on direct groundwater recharge in a humid tropical basin based on a simple conceptual model. *Hydrological Processes*, 26(11), 1655-1671.

Tirol, N. & Baba, A. (2023). Evaluation of GIS Based Spatial Interpolation Methods For Groundwater Level: Case Study of Türkiye, Water Environment Research (incelemede).

Trenberth, K. E., Moore, B., Karl, T. R., & Nobre, C. (2006). Monitoring and prediction of the Earth's climate: A future perspective. *Journal of climate*, 19(20), 5001-5008.

Türkeş M. (2012). Türkiye'de gözlenen ve öngörülen iklim değişikliği, kuraklık ve çölleşme. *Ankara Üniversitesi Çevrebilimleri Dergisi,* 4(2), 1-32. doi:10.1501/csaum_0000000063

Türkeş M, Sümer, U.M. & Kılıç, G. (1995). Variations and trends in annual mean air temperatures in Türkiye with respect to climatic variability. *Int J Climatol* 15, 557–569.

United Nations, The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible. UNESCO, Paris.

URL-1, (2008). BGR/UNESCO (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe/United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). WHYMAP. Groundwater Resources of the World. Map at scale 1: 25 000 000. Hannover/Paris. www.whymap.org/whymap/EN/Maps_Data/maps_data_node_en.html;jsessionid=66DD893882B11D6409B9BA3C76B2F141.2_cid292 Erişim tarihi: 20.10.2022

URL-2, (2020). DSI (State Hydraulic Works). https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/1344 Erişim tarihi: 28.09.2022

URL-3, (2022). Koçbay, A. Türkiye'de Yer altı Suyu Yönetimi. TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası. https://www.youtube.com/watch?v=YhVNx-Cm_hw Erişim tarihi: 01.05.2022

URL-4, (2022). World Resources Institute, Aqueduct, https://www.wri.org/aqueduct. Erişim tarihi : 09.10.2022

Uyan, M., & Cay, T. (2013). Spatial analyses of groundwater level differences using geostatistical modeling. *Environmental and Ecological Statistics*, 20(4), 633–646. https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.14076

Wada Y., Beek L.P.H., Kempen C.M., Reckman J.W.T.M., Vasak S., Bierkens M.F.P. (2010). Global depletion of groundwater resources. *Geophys Res Lett,* 37(20), L20402. doi:10.1029/ 2010gl044571

Xiao, Y., Gu, X., Yin, S., Shao, J., Cui, Y., Zhang, Q., & Niu, Y. (2016). Geostatistical interpolation model selection based on ArcGIS and spatio-temporal variability analysis of groundwater level in piedmont plains, northwest China. *SpringerPlus*, 5(1), 425. https://doi.org/10.1186/s40064-016-2073-0

Yagbasan, O. (2016). Impacts of climate change on groundwater recharge in Küçük Menderes River Basin in Western Türkiye. *Geodinamica Acta*, 28(3), 209–222. https://doi.org/10.1080/09853111.2015.1121802

## Yazarlar Hakkında / About Authors

**Prof. Dr. Alper BABA | İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü |**
**alperbaba[at]iyte.edu.tr | ORCID: 0000-0001-5307-3156**

1992 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi, Müh. Mim. Fak. Jeoloji Mühendisliği Bölümü Lisansını, 1995 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uygulamalı Jeoloji Anabilim Dalı Yüksek Lisansını, 2000 yılında ise aynı üniversitede doktora eğitimini tamamladı. 2001 yılında Yardımcı Doçent Doktor, 2006 yılında ise Doçent Doktor olarak Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Müh-Mim. Fak. Jeoloji Mühendisliği Bölümünde görev yaptı. 2003 yılında Birleşmiş Milletler Üniversitesi (İzlanda), Jeotermal Enerji Programında ve 2005 yılında Wayne State Üniversitesi (USA), İnşaat ve Çevre Müh. Bölümü araştırmacı olarak bulundu. 2009-2013 yılları arasında ise İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde Doçent olarak görev aldı. 2012 yılında Toronto Üniversitesi (Kanada), Çevre Bilimleri Bölümünde misafir öğretim üyesi olarak bulundu. 2012-2013 yıllarında İzmir Ekonomi Üniversitesi, Sürdürülebilir Enerji Bölümünde yarı zamanlı öğretim üyesi olarak görev yaptı. 2013 yılından bu yana, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde Profesör Doktor olarak çalışmaktadır. Dr. Baba 2004 yılında, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası tarafından verilen Altın Çekiç Araştırma Ödülünü (Uygulamalı Jeoloji Dalında), 2004, 2005, 2021 ve 2022 yıllarında ise TÜBİTAK tarafından verilen AB Altıncı Çerçeve Programı Proje Önerisi Özendirme Ödülü ve 2007 yılında TÜBA-GEBIP ödüllerini aldı. Dr. Baba'nın Uluslararası Atıf Endeksleri kapsamındaki dergilerde basılmış çok sayıda yayını, uluslararası dergilerde basılmış ve konferanslarda sunulmuş 100'ün üzerine makalesi ve ulusal dergilerde sunulmuş ve basılmış 100 üzerinde bildirisi vardır. Bunlardan başka editörlüğünü yaptığı üç adet uluslararası kitabı ve uluslararası on kitapta birer bölümü bulunmaktadır.

**Prof. Dr. Alper BABA | Izmir Institute of Technology |**
**alperbaba[at]iyte.edu.tr | ORCID: 0000-0001-5307-3156**

Dr. Alper Baba holds BSc in Geological Engineering in 1992 and MSc in Applied Geology from the Institute of Natural and Applied Sciences at Dokuz Eylul University in 1995, and his doctorate in 2000 at the same university. He became an Assistant Professor in 2001 and an Associate Professor in 2006 at Çanakkale Onsekiz Mart University. He graduated from United Nations University (Iceland), Geothermal Energy Program in 2003, and work as a researcher in Civil and Environmental Eng. at Wayne State University (USA) in 2005. In 2012, he was a visiting professor at the Department of Environmental Sciences at the University of Toronto (Canada). Also, he worked as a part-time lecturer in the Department of Sustainable Energy at Izmir University of Economics from 2012 to 2013. He has worked as a professor in the Department of Civil Engineering at Izmir Institute of Technology since 2009. Dr. Baba was awarded the "Successful Young Scientists Award" of the Turkish Academy of Science and the Turkish Geological Engineering Association "Gold Medal Award". Also, he received the EU Sixth Framework Program Project Proposal Encouragement Award given by TUBITAK in 2004, 2005, 2021, and 2022. Apart from these, Dr. Baba is the author of more than a hundred peer-reviewed scientific publications and contributions to international conferences and is an editor of three international books and ten chapters in international books.

**Arş. Gör. Nilüfer TİROL | İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü |**
**nilufertirol[at]iyte.edu.tr | ORCID: 0000-0003-0239-1677**

Nilüfer Tirol lisans eğitimini 2015 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Çevre Mühendisliği Bölümü'nde, yüksek lisans eğitimini ise 2017 yılında yine aynı üniversitenin Çevre Bilimleri ve Mühendisliği lisansüstü programında tamamlamıştır. Yüksek lisans tezinde atıksuların arıtılması ve membran biyoreaktörler konusunda çalışmalar yapmıştır. İki yıllık özel sektör deneyimi sonrası doktora eğitimine devam etmek isteyerek 2019 yılında İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü (İYTE) Çevre Bilimleri ve Mühendisliği doktora programına kabul almıştır. 2021 yılından itibaren ise Çevre Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev almaktadır. Şu anki çalışma alanları arasında iklim değişikliği, kentsel su dengesi, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, coğrafi bilgi sistemleri, iklim değişikliğine adaptasyon yöntemleri sayılabilir.

**Res. Asst. Nilüfer TİROL | Izmir Institute of Technology |**
**nilufertirol[at]iyte.edu.tr | ORCID: 0000-0003-0239-1677**

Nilüfer Tirol completed her bachelor of science at Istanbul Technical University (ITU), Environmental Engineering Department in 2015. She completed her master's degree in the Environmental Sciences and Engineering program at the same university in 2017. She worked on wastewater treatment and membrane bioreactors in her master's thesis. In 2019, after two years of sectoral experience, she wanted to continue her doctoral education and was accepted to the Izmir Institute of Technology (IZTECH), Environmental Sciences and Engineering program. Nilüfer has been working as a research assistant in the IZTECH, Department of Environmental Engineering since 2021. Her current areas of work include climate change, urban water balance, sustainable management of water resources, geographic information systems, and climate change adaptation methods.

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN TÜRKİYE SU KAYNAKLARINA ETKİLERİ VE UYUM

# CLIMATE CHANGE IMPACTS ON WATER RESOURCES' OF TÜRKİYE AND ADAPTATION

*Ayşe YILDIRIM COŞGUN*

DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch07

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN TÜRKİYE SU KAYNAKLARINA ETKİLERİ VE UYUM

***Ayşe YILDIRIM COŞGUN***
*Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü*

**Özet**

Dünyanın iklimi alışık olunandan çok daha hızlı bir şekilde değişmektedir ve iklim değişikliği insanın merkezinde olduğu tüm sistemleri oldukça olumsuz yönde etkilemiştir. Türkiye iklim değişikliğinden çok etkilenecek Akdeniz Havzası'nda yer aldığı için başta su kaynakları, tarımsal faaliyetler, suya bağlı afetler ve ormanlar olmak üzere her sektörde etkilenmektedir. İklim değişikliği neticesinde Türkiye genelinde ortalama sıcaklık artışlarının yüzyılın sonunda 5,9°C'ye ulaşması beklenmekte, yağış azalmalarının her bölgede farklılık arz etmekle birlikte, 2050'den itibaren daha belirgin olması, toplam kar örtüsünde de azalmalar beklenmektedir. Bu sebeple Fırat-Dicle ve Konya Kapalı Havzalarında ciddi su açığı olacağı tahmin edilmektedir.

***Anahtar Kelimeler***
*İklim değişikliği, Su kaynakları, İklim değişikliğine uyum*

# CLIMATE CHANGE IMPACTS ON WATER RESOURCES' OF TÜRKİYE AND ADAPTATION

***Ayşe YILDIRIM COŞGUN***

*General Directorate of Water Management under the Ministry Agriculture and Forestry*

**Abstract**

Earth's climate is changing much faster than it is used to be. Climate change has adversely affected all systems in which human beings are at the center. Since Türkiye is located in Mediterranean Basin, which will be greatly affected by climate change; all sectors including water resources, agriculture, hydrometeorological disasters and forests are under threat. Average temperature increases across Türkiye are expected to reach 5.9°C by the end of the century due to climate change. Although precipitation decreases vary in each region, it is expected to become more prominent by 2050s. Furthermore, reductions in snow cover are expected. As a result, it is estimated that there will be a serious water deficit in the Euphrates-Tigris and Konya River Basins.

***Keywords***

*Climate change, Water resources, Adaptation to climate change*

## 1. İklim Değişikliği ve Su Kaynakları Çalışmaları

Sanayileşmeyle beraber atmosferdeki sera gazlarının miktarındaki artış, öncelikle ortalama sıcaklığın artmasına; bununla ilişkili olarak da Dünya'nın iklim sisteminde değişikliklere yol açmıştır. Dünyamız önceki yüzyıllarda sıcaklık değişikliklerine, yani doğal iklim değişimine aşina olmasına rağmen değişimin şu andaki hızı gezegenimizin bu değişikliğe uyum sağlayabileceğinden çok çok hızlı olmaktadır. Bu nedenle 19. yüzyılın ikinci yarısından itibaren doğal iklim değişikliğine ilave olarak, iklim; insan etkisiyle ve dünyanın alışık olduğundan çok daha hızlı bir şekilde değişmektedir. İklim değişikliği insanın merkezinde olduğu tüm sistemleri oldukça olumsuz yönde etkilemektedir.

İklim değişikliğinin var olduğu, gelecek dönemde dünyayı nasıl etkileyeceği ve sorunun ancak sera gazı salımlarının azaltılmasıyla çözülebileceği konularında bilim insanları arasında uzlaşma sağlanmıştır. Uzlaşma sağlanamayan hususlar politikacılar arasında olup, salımların nasıl kesileceği ya da azaltılacağına ilişkindir; keza konunun mutlak çözümü için fosil yakıtların kullanımını esas alan ve dünya ekonomisinin temel taşlarını yerinden oynatacak radikal politik adımlara ihtiyaç vardır. İklim değişikliğinin ekosisteme geri döndürülemez zararlar vermesini engellemek için küresel ölçekte sıfır-karbon'a ulaşılması gerekmektedir. Ancak küresel sera gazı salımlarının yıllar içindeki seyrine bakıldığında, iklim değişikliği ile mücadele çalışmalarının ciddi bir azalmayı sağlayamadığı görülmektedir. Bu sağlansa bile atmosferdeki mevcut sera gazlarının küresel etkilerinin yüzyıllar süreceği tahmin edilmektedir.

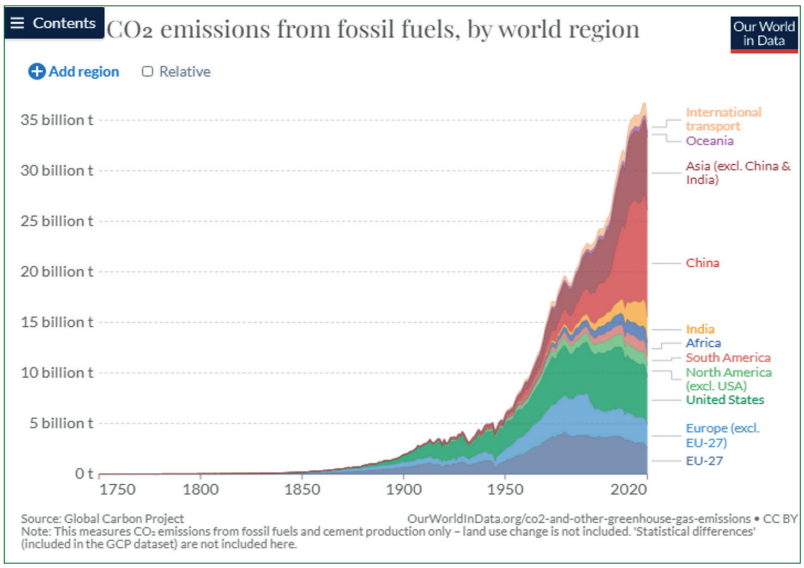
Ülkemiz, iklim değişikliğinin etkilerinin yoğun olarak hissedileceği Akdeniz'in doğusunda yer aldığı için yüksek riskli ülkeler arasında sayılmaktadır. Türkiye'nin ikliminde de benzer değişimler gözlenmekte ve 21. yüzyılda Güney Avrupa'da ve ülkemizde daha sık, şiddetli ve uzun süreli kuraklıklar, sıcak hava dalgaları ve orman yangınları beklenmektedir. Ayrıca kısa süreli ancak şiddetli yağışların olduğu gün sayısının artmasıyla birlikte ani sellerde de önemli artışların olacağı tahmin ediliyor.

## 2. Dünyada ve Ülkemizde İklim Değişikliği Etkileri, Gelecek Dönem Projeksiyonları

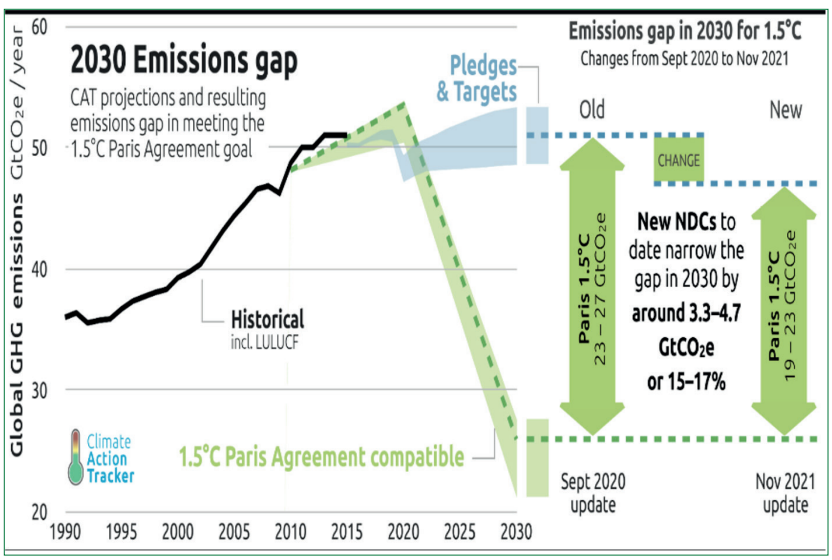
Küresel ortalama sıcaklık 19. yüzyıldan bu yana yaklaşık 1.1°C arttı. Sıcaklık artış miktarının yanı sıra artışın hızı da artmaktadır. 1880'den 1970'e kadar, küresel ortalama sıcaklık her on yılda yaklaşık 0,003°C arttı. 1975'ten bu yana ortalama artış her on yılda yaklaşık 0.20°C olmuştur (Earth Observatory, 2018).

Avrupa Çevre Ajansı'nın 2016 yılında yayımladığı raporuna göre ülkemizin de içinde olduğu Akdeniz Bölgesinde aşırı sıcaklıklarda artış, yağış ve akışta azalma, kuraklık olaylarında artış, biyoçeşitlilik kaybında artış, orman yangınlarında artış, su kullanıcıları arasında çekişme, tarımsal su ihtiyacında artış, ürün veriminde azalma, hayvansal üretimde azalma, sıcak hava dalgaları nedeniyle ölüm riskinde artış, güneyli salgın vektörlerin habitatında genişleme, enerji

üretimi potansiyelinde azalma, soğutma enerjisi talebinde artış, yaz turizminde azalma, diğer mevsimler için artış, çoğu ekonomik sektörün olumsuz etkilenmesi beklenmektedir. Aynı rapora göre doğu ve güneydoğu bölgelerimizdeki dağlık alanlarda ise Avrupa ortalamasından daha yüksek sıcaklık artışı, kar yükü ve karla kaplı alanlarda azalma, bitki ve hayvan türlerinde daha yükseklere çekilme, nesli tükenmekte olan tür sayısında artış, orman haşerelerinde artış, kaya düşmesi ve heyelan riskinde artış, hidroelektrik potansiyelinde değişiklikler, kış turizminde azalma öngörülmektedir (Climate Change, 2017).




***Şekil 1.*** *Küresel Sera Gazı Emisyonları (Ritchie & Roser, 2023).*




***Şekil 2.*** *Küresel Sera Gazı Bütçesi (Climate Action Tracker, 2022).*

Yukarda bahsedilen küresel sıcaklık artışı tüm dünyada iklim sistemlerini etkilemiş; değişen iklim ise başta çevre sorunlarına, sonrasında ise gıda arzından sağlığa, kalkınmadan ulusal güvenliğe kadar geniş yelpazede sorunlara neden olmakta; esasında ise tüm devletler için kalkınma sorunlarının yolunu açmaktadır. İklim değişikliğinin gelecek dönemde beklenen etkilerinin mevcut etkilerinden daha derin olması beklenmektedir. İklimin değişmesine neden olan sera gazlarının azaltılması hatta sıfırlanması amacını güden uluslararası çalışmalar Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi çerçevesinde 1990lı yıllardan itibaren devam etmektedir.

Ancak tüm bu olumsuz tabloya rağmen küresel emisyonların azaltılmasına yönelik çalışmalar iklimin değişmesini durdurmaktan çok ötededir. Şekil 1'de sanayi devriminden günümüze kadar küresel emisyonlar, Şekil 2'de de Paris Anlaşması hedeflerine erişilebilmesi için azaltılması gereken emisyon miktarları gösterilmektedir.

Şekil 1 ve 2'den anlaşılabileceği üzere tüm dünya milletleri olarak emisyonların azaltılmasına ilişkin karnemiz zayıf durumdadır. İklim tüm çabalara rağmen değişmektedir. Bu çerçevede değişen iklime uyum sağlama çabaları daha fazla önem kazanmaktadır.

## 3. İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkileri

Nüfus artışı, hızlı ve plansız şehirleşme ve aşırı tüketim gibi sebeplerle zaten baskı altında olan su kaynakları, iklim değişikliğinin de etkisiyle tüm dünyada hem miktar hem de kalite bakımından olumsuz etkilenmektedir. Bu baskıların oluşturduğu etkilerin, gelecekte de artarak devam etmesi beklenmektedir.

Bu etkileri artıran ana sebeplerden birinin iklim değişikliği olduğu artık tüm bilim çevreleri tarafından kabul edilmektedir. Son yıllarda küresel ölçekte yaşanan sel ve kuraklık gibi hidrometeorolojik karakterli afetler, başta insan hayatı olmak üzere ekosistem ve su kaynaklarını tehdit altında tutmakta ve bu afetlerin, etkisi ve süresi bölgenin ekonomisini ve yaşam standartlarını önemli ölçüde etkilemektedir.

Dünyanın belirli bölgelerinde sağlıklı suya erişimde veya su kullanımı hususunda sıkıntı yaşanırken, belirli bölgelerinde ise düzensiz ve aşırı yağışlar sebebiyle taşkın ve heyelan gibi doğal afetlerle mücadele etmek zorunda kalınmaktadır.

İklim değişikliği öncelikle sıcaklıklardaki artış ve küresel ısınma olarak düşünülse de iklim değişikliğinin en önemli etkileri yağış rejiminin değişmesi nedeniyle oluşacak etkilerdir. Hidrolojik sistem, dünyadaki iklim koşullarından doğrudan ve dolaylı olarak etkilenir. Sıcaklıklardaki değişiklikler, buharlaşma ve terleme oranını, bulut özelliklerini, toprak nemini, fırtına yoğunluğunu ve kar yağışı ve kar erimeleri rejimlerini etkiler.

İklim değişikliği neticesinde hidrolojik çevrimde oluşan önemli değişkenler şöyledir:

- Yağış örüntüsündeki değişimler,
- Ortalama yıllık yüzey akışı değişimleri,
- Kıyı çevresinde hidrolojik etkiler,
- Su kalitesindeki değişiklikler,
- Yeraltı sularındaki değişiklikler,
- Sel ve kuraklık üzerindeki etkiler,
- Su sıcaklıkları üzerindeki etkiler,
- Su talebindeki değişiklikler,

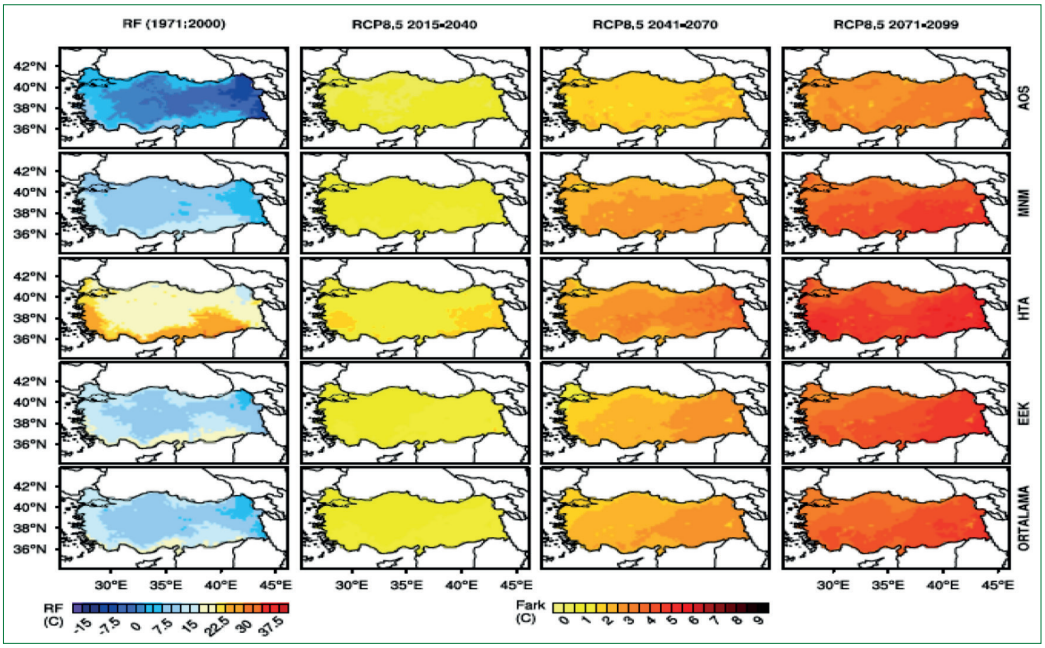
## 4. İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarımıza Etkilerine ve Uyuma İlişkin Çalışmalar

### 4.1. İklim Değişikliğinin Etkisinin Belirlenmesi

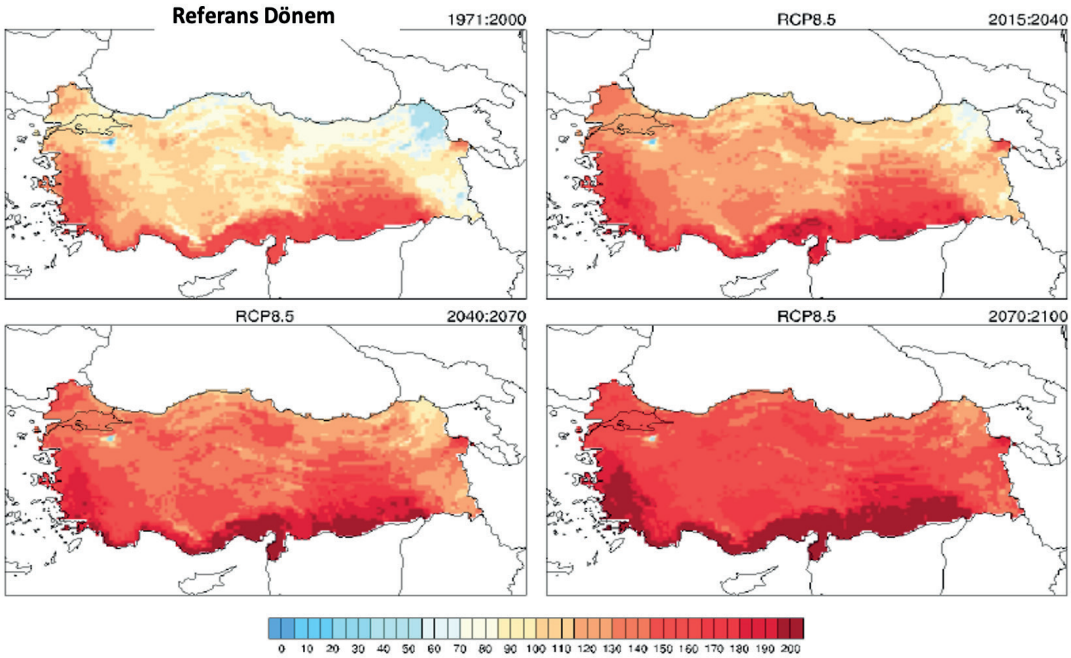
Ülkemiz, hayati ve toplumsal öneme sahip bir kaynak olan su kaynakları açısından dünyanın yarı-kurak bir bölgesinde yer almaktadır. Türkiye'nin yağış rejimi, mevsimlere ve bölgelere göre büyük farklılıklar arz etmektedir.

İklim değişikliğinin yüzey ve yeraltı su kaynaklarımızı havzalar özelinde nasıl etkileyeceğinin tespiti amacıyla gerçekleştirilmiş olan "İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkileri Projesi" Su Yönetimi Genel Müdürlüğü'nce 2016 yılında tamamlanmıştır (SYGM, 2016). Projenin uygulama alanı tüm Türkiye'yi kapsayan 25 nehir havzası olup, projeksiyon dönemi 2015 ve 2100 yılları arasıdır. İlk kez bu projede Türkiye için 10x10 km çözünürlükte 3 küresel iklim modeli (HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR ve CNRM-5.1) ve RCP4.5 ve RCP8.5 emisyon senaryoları ile 2015-2100 yılları için gelecek dönem iklim projeksiyonları elde edilmiştir. Model simülasyonları aracılığı ile toplam 8 parametre ve ekstrem durumları temsil eden 17 iklim indisine ait projeksiyonlar tüm havzalar (25 havza) ölçeğinde oluşturulmuş, incelenen parametrelerin 1971-2000 yılı simülasyonları olarak kabul edilen referans dönemine göre 2100 yılına kadar farkları, 10'ar ve 30'ar yıllık dönemler için mevsimlik ve yıllık ortalamalar halinde hesaplanmıştır. Hidrolojik modeller vasıtasıyla yağış değerleri akış değerlerine çevrilmiş, tüm havzalarda yüzey ve yer altı su kaynaklarının mevcut durumu ve gelecekte su bütçesinde beklenen değişimler elde edilerek su fazlası/açığı hesaplanmıştır. Bu proje ile Türkiye'de ilk kez tüm havzaların su potansiyelleri ortak hidrolojik model ile hesaplanmıştır. .

Türkiye genelinde ortalama sıcaklık artışlarının iyimser beklentilere göre 2°C, kötümser beklentilere göre ise 5,9°C'ye ulaşması beklenmektedir. Artışların projeksiyon dönemi boyunca en fazla Türkiye'nin Doğu ve Güneydoğusunda meydana geleceği ve diğer bölgelere göre 1-2°C daha fazla olacağı tahmin edilmektedir.

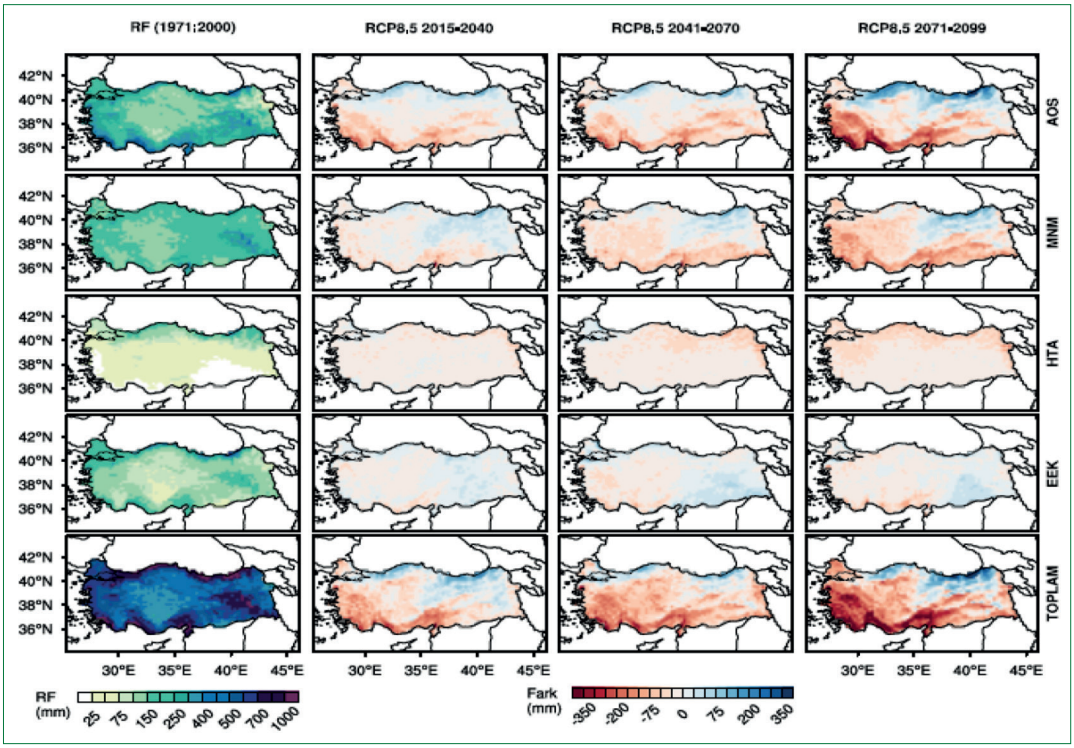



***Şekil 3.*** *Ortalama Sıcaklıklarda Anomali Projeksiyonları (MPI-ESM-MR Modeli Rcp8.5 Senaryosunun 2015-2100 yıllarını gösteren 30'ar yıllık mevsimsel ortalamalar) (SYGM, 2016).*




***Şekil 4.*** *Maksimum Sıcaklığın 25°C'nin Üzerinde Olduğu Gün Sayısı Projeksiyonları (SYGM, 2016).*

Ülkemizin güneyinde ve batı kesimlerinde %15'e varan yağış noksanlıkları beklenirken kuzey enlemlerinde %4 civarında yağış artışları öngörülmektedir. Yağış azalmalarının 2050'den itibaren daha belirgin olması beklenmektedir. Özellikle Güneydoğu ve Doğu bölgelerinde negatif yağış anomalileri göze çarpmaktadır. Beklenen yağış eksiklikleri ile beraber buharlaşma hızının artması su kaynaklarında ve tarımsal sektörde stresi yükseltecektir.




***Şekil 5.*** *Toplam Yağışta Anomali Projeksiyonları (MPI-ESM-MR Modeli Rcp8.5 Senaryosunun 2015-2100 yıllarını gösteren 30'ar yıllık mevsimsel ortalamalar) (SYGM, 2016).*

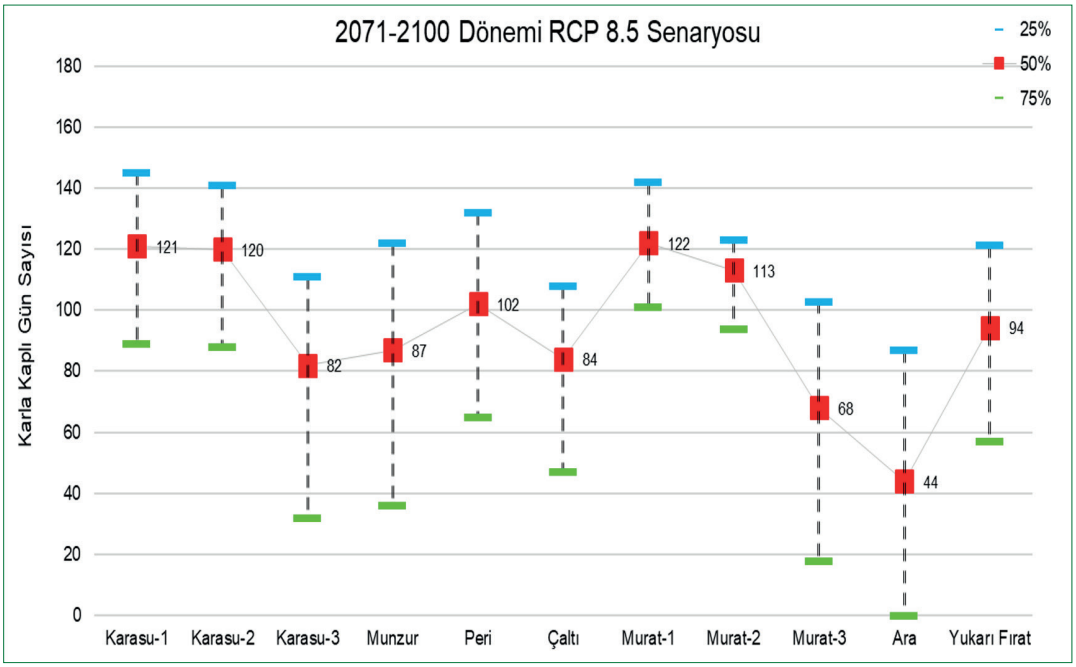
Bunun yanı sıra, medyan brüt su potansiyellerinin, referans dönemi medyan değerine göre %40-45 (RCP 8.5) azalacağı tahmin edilmektedir. RCP4.5'e göre ise, medyan brüt su potansiyeli azalma oranının %15-20 aralığında kalması beklenmektedir. Havzaların su potansiyelindeki değişim ile nüfus ve yatırım planlarına göre belirlenmiş su tüketim projeksiyonları birleştirildiğinde, tüm senaryolar ve projeksiyon dönemlerinde Fırat-Dicle ve Konya Kapalı Havzalarında önemli su açığı; Doğu Karadeniz ve Çoruh Havzalarında tüm projeksiyon dönemleri boyunca su fazlası beklenmekte; Marmara, Susurluk, Kuzey Ege, Batı Akdeniz, Batı Karadeniz, Yeşilırmak, Antalya, Aras ve Van Gölü Havzalarında da genel itibariyle suyun yeterli olabileceği gözükmektedir.

Ayrıca, bu proje kapsamında ülkemizde ilk kez sektörel etkilenebilirlik metodolojisi oluşturulmuştur. 3 pilot havza olarak seçilen Büyük Menderes Havzası, Ceyhan Havzası ve Meriç-Ergene Havzalarında içme ve kullanma suyu, tarım, sanayi, ekosistem hizmetleri ve turizm/enerji/tekstil alt sektörleri için etkilenebilirlik durumları belirlenmiştir. Söz konusu metodoloji daha sonra geliştirilerek kuraklık yönetim planları hazırlanması çalışmaları kapsamında en çok etkilenecek sektörlerin ve alınması gereken tedbirlerin belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Projenin diğer bir aşamasında, Türkiye geneli için 12 ana sektör bazında toplamda 138 uyum faaliyeti incelenmiştir. Su kaynakları özelinde esasen suyun verimli kullanımını teşvik eden tedbirler yer almaktadır. Söz konusu çalışma sonuçları sektörlerin iklim değişikliğine karşı daha dirençli olabilmek amacıyla uygulaması gereken faaliyetler ışığında bir rehber niteliğindedir.

Yine Su Yönetimi Genel Müdürlüğü'nce 2019 yılında tamamlanmış olan "İklim Değişikliğinin Kar Erimelerine ve Akımlarına Etkisinin Belirlenmesi Projesi" ile büyük oranda kar yağışıyla beslenen Keban Barajı Havzası'nda (Yukarı Fırat Havzası), iklim değişikliğinin kar yükü ve erimelerine etkisinin ve bu erimelerin akarsu akımlarında meydana getireceği değişimler tespit edilmiştir [6]. Proje kapsamında, rakım ve aylara göre kar derinliği, kar-su eşdeğeri, aylara göre kar yoğunluğu ve minimum kar kotunun değişimleri analiz edilerek, karla kaplı alan ve kar örtüsünün karakterizasyonu yapılmış, hidrolojik modelleme çalışmaları için doğal akımlar elde edilmiş, 3 farklı hidrolojik model kullanılarak mevcut durum ve gelecek durum tahminleri elde edilmiştir.

Gelecek dönemde iklim değişikliği nedeniyle Yukarı Fırat Havzası'nın kar olarak düşen yağışlar yerine daha çok yağmur olarak düşen yağışlarla besleneceği öngörülmektedir. Modelleme çalışmalarına göre özellikle yüzyılın son çeyreğinde yüksek kotlu bölgelerde karla kaplı alan değişiminin kötümser senaryoya göre %44'lere varan bir azalma öngörülmekte, bununla birlikte kar birikme ve erime dönemlerinin zamansal olarak kısalması beklenmektedir.

2071-2100 periyodunda kötümser senaryoya göre, karla kaplı alanın %50'nin üzerinde olduğu gün sayısında membadaki havzalarda ortalama 25 günlük azalma, mansaptaki havzalarda ise ortalama 50 günlük bir azalma olacağı öngörülmektedir. Yine aynı dönem ve senaryo için mansaptaki havzalarda kardan gelen suyun yaklaşık %70, yüzeysel akışın ise yaklaşık %15 oranında azalacağı beklenmektedir. Tepe akımının ortalama geliş süresinin ise 10 gün kadar öne çekilebileceği tahmin edilmektedir. Erime döneminde (Mart-Haziran) Yukarı Fırat Havzası'nı besleyen toplam akımların, projeksiyon döneminde mevcut duruma göre %13 oranında azalması öngörülmektedir.




***Şekil 6.*** *RCP8.5 Senaryosu 2071-2100 Dönemi Karla Kaplı Gün Sayıları (SYGM, 2019).*

### 4.2. İklim Değişikliğine Uyum Sağlama

İklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmaya yönelik çalışmalara uyum çalışmaları denir (Dünya Bankası Raporu, 2010). Bir diğer deyişle iklim değişikliğine uyum; iklim olaylarının (risklerinin) etkileriyle mücadele etmek, fayda sağlamak ve etkileri yönetebilmek için stratejilerin güçlendirilmesi, geliştirilmesi ve uygulanması sürecidir (IPCC, 2007).

İklim değişikliğine uyumun önemi, ne yaparsak yapalım iklim değişikliğinin etkilerinin devam edecek olmasından kaynaklanmaktadır. İklim değişikliğine neden olan etkenleri (sera gazı emisyonları, ormansızlaşma vb.) şimdi ortadan kaldırsak bile etkileri devam edecek. Yani iklimi değiştiremeyeceğimize göre kendimizi değişen iklime uyarlamak zorundayız.

İklim değişikliğine uyum faaliyetlerinin planlanabilmesi için öncelikle etkilenebilirliğin belirlenmesi gerekmektedir. İklim değişikliğine uyum faaliyetlerinin birçoğu geçmişte iklim değişmese bile yapılmış ve yürütülmekte olan faaliyetlerdir. İklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmak için bu tür planlı uyum çalışmalarının hem ülkemizde ve hem de dünyada yaygınlaştırılması gerekmektedir.

Su kaynaklarının yönetiminde değişen iklime uyum sağlamak üzere havzalar özelinde yürütülen uyum faaliyetlerinden önemli bir tanesi nehir havza yönetim planları, kuraklık yönetim planları ve sektörel tahsis planları gibi tüm planlarda iklim projeksiyonlarının dikkate alınmasıdır.

Kuraklık öncesi, kuraklık esnası ve kuraklık sonrasında alınması gereken tedbirleri planlayan ve kuraklık yönetimi hususunda kriz yönetimi anlayışından risk yönetimi anlayışına geçiş sağlayan havza bazlı "kuraklık yönetim planları" iklim projeksiyonlarını dikkate almaktadır (SYGM, 2023a). Suyun havzada iklim değişikliği göz önünde bulundurularak tahsis edilmesi iyi planlama açısından şarttır. Bu kapsamda "Havza Su Tahsis Planları" ile havza ve sektörel alt havza ölçeğinde her sektörün (içme-kullanma, çevre, tarım, enerji, sanayi, ve havzaya özgü önemli olan diğer sektörler) ihtiyacı olan suyun, ekonomik, sosyal ve çevresel açıdan analiz edilerek, adil bir şekilde geleceğe yönelik planlanması yapılmaktadır (SYGM, 2023b). Havza esaslı planlamanın en üst seviyesi olan nehir havza yönetim planlarında iklim değişikliği etkilerinin göz önünde bulundurulması da önem arz etmektedir. Ülkemizin tüm nehir havzaları için hazırlanmakta olan "nehir havza yönetim planları"nda su miktarı ve kalitesi birlikte ele alınmakta, bütün su kütlelerinde iyi su durumuna ulaşılması maksadıyla alınması gerekli tedbirler, maliyetler ve bu tedbirlerden mesul kurumlar belirlenmektedir (SYGM, 2023c).

Bunların yanısıra, suyun verimli kullanılmasını ve tasarrufunu sağlayan her türlü tedbir, çalışma iklim değişikliğine uyum sağlamaya da hizmet eder. İçme-kullanma suyu şebekelerinde kayıpların azaltılması, sulama randımanının arttırılması hayati yönetim stratejileridir. Bu kapsamda, yağmur suyu hasadı ve gri suyun yeniden kullanımının yaygınlaştırılması amacıyla çalışmalar yürütülmekte; oteller, konutlar, spor salonları, kamu binaları gibi çok sayıda alanda uygulama maliyetleri ve uygulamanın önündeki engellerin analiz edildiği "Su Kaynaklarında İklim Değişikliğine Uyum Projesi" 2023 yılında tamamlanacaktır.

## 5. Sonuç ve Değerlendirme

Dünyamız önceki yüzyıllarda sıcaklık değişikliklerine, yani doğal iklim değişimine aşina olmasına rağmen değişimin şu andaki hızı gezegenimizin bu değişikliğe uyum sağlayabileceğinden çok çok hızlı olmaktadır. Gelecek dönemde ülkemizde daha sık, şiddetli ve uzun süreli kuraklıklar, taşkın ve sel afetleri, sıcak hava dalgaları ve orman yangınlarının görülmesi beklenmektedir. Bu nedenle, geleceğin geçmiş gibi olmayacağı düsturu her ölçekteki planlama çalışmasında göz önünde bulundurulmalıdır.

Nüfus artışı, çarpık kentleşme ve aşırı tüketim gibi sebeplerden ötürü fazlasıyla tüketilen su kaynakları, iklim değişikliğinin de etkisiyle tüm dünyada hem miktar hem de kalite bakımından olumsuz etkilenmektedir. Su sınırsız bir kaynak değil, aksine her geçen gün kalite ve miktar yönüyle son derece sınırlı hale gelen bir kaynaktır.

Değişen iklimin olumsuz etkileri kırılganlığı yüksek, uyum sağlama kapasitesi düşük toplulukları daha da derinden etkilemektedir. İklim değişikliğinin şiddetini arttırdığı kuraklık ve sel afetlerine karşı tedbirlerin önceden planlandığı; tarımsal ürün deseninin çeşitli ve esnek olduğu coğrafyalar su kaynakları açısından esnekliği yüksek, dolayısıyla iklim değişikliğine karşı dirençli; afet riski yönetimi ve gıda arzı sürekliliği açısından güçlü bölgelerdir.

Bu sebeple, gelişmiş ülkelerdeki su yönetiminin temel prensipleri olan katılımcı ve bütünleşik bir yaklaşımla su politikalarının ve stratejilerinin belirlenmesi, su kaynaklarının havza ölçeğinde hem miktar hem de kalite açısından korunması, geliştirilmesi, kontrol edilmesi, verimli ve sürdürülebilir şekilde kullanılmasına yönelik planların hazırlanması hususlarının Ülkemizde de uygulanması gerekmektedir. Suyun verimli kullanılmasını sağlayan tüm tedbirler; değişen iklime de uyum sağlamayı temin etmektedir, aynı zamanda kuraklık afetine karşı da hayati tedbirlerdir. Bu bağlamda, yağmur suyu hasadı ve gri suyun kullanımının yaygınlaştırılması, suyun çevresel maliyetlerinin de hesaplanarak doğru fiyatlandırılması önem arz etmektedir.

## 6. Kaynaklar / References


Climate Action Tracker (2022). *CAT Emissions Gap*. https://climateactiontracker.org/global/cat-emissions-gaps/ adresinden alındı. 13.01.2023.

Climate Change (2017)*, Impacts and Vulnerability in Europe 2016-An Indicator-Based Report, 2017.*

Dünya Bankası Raporu (2010). *Hallegatte S, Lecocq F, Perthuis C, Policy Research Working Paper 5568, Designing Climate Change Adaptation Policies An Economic Framework, Dünya Bankası, 2010.*

Earth Observatory (2018). *World of Change, Global Temperatures*. https://earthobservatory.nasa.gov/Features/WorldOfChange/decadaltemp.php adresinden alındı. 13 Şubat 2018.

IPCC (2007). Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), 4. Değerlendirme Raporu (AR4), Climate Change 2007, The Physical Science Basis, Summary for Policymakers, 2007.

Ritchie, H. & Roser, M. (2023). *$CO_2$ Emissions.* https://ourworldindata.org/co2-emissions *adresinden alındı.* 13.01.2023.

SYGM (2016). *İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkisi Projesi Raporları.* T.C. Mülga Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.

SYGM (2019). İklim Değişikliğinin Kar Erimelerine ve Akımlarına Etkisinin Belirlenmesi Projesi *Raporları*. T.C. Mülga Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.

SYGM (2023a). *Kuraklık Yönetim Planlarının Hazırlanması Projesi Raporları.* Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara. https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=61 adresinden alınmıştır. 08.03.2023.

SYGM (2023b). *Sektörel Tahsis Planlarının Hazırlanması Projesi Raporları.* Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara. https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=10 adresinden alınmıştır. 08.03.2023.

SYGM (2023c). *Nehir Havza Yönetim Planlarının Hazırlanması Projesi Raporları.* Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara. https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=49 adresinden alınmıştır. 08.03.2023.

## Yazar Hakkında / About Author

**Uzman Ayşe Yıldırım ÇOŞGUN | Tarım ve Orman Bakanlığı |**
**ayse.yildirimcosgun[at]tarimorman.gov.tr | ORCID: 0009-0007-5365-5229**
Ayşe Yıldırım Coşgun, 1981'de Ankara'da doğdu. Lisans eğitimini Orta Doğu Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümünde, yüksek lisans eğitimini Hacettepe Üniversitesi Temiz ve Tükenmez Enerjiler Programında tamamladı. OSTİM Organize Sanayi Bölge Müdürlüğünde 3 yıl Çevre Müdürü olarak çalıştıktan sonra 2007 ve 2011 yılları arasında Çevre ve Orman Bakanlığı- Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü'nde uzman olarak görev yaptı. 2011 yılından beri ise Tarım ve Orman Bakanlığı- Su Yönetimi Genel Müdürlüğü'nde çalışma grubu sorumlusu olarak görev yapıyor. İklim değişikliğinin etkileri, su kaynakları ve değişen iklime uyum konularında çok sayıda proje ve yayının hazırlanmasında görev aldı.

**Expert Ayşe Yıldırım ÇOŞGUN | Ministry of Agriculture and Forestry |**
**ayse.yildirimcosgun[at]tarimorman.gov.tr | ORCID: 0009-0007-5365-5229**
Ayşe Yıldırım Coşgun was born in 1981 in Ankara. She had her Bachelor of Science degree on Environmental Engineering Department at METU- Middle East Technical University; and Master of Science Degree on Renewable Energies at Hacettepe University. After working as Environmental Manager in OSTİM Organized Industrial Zone for 3 years, she worked as technical expert at the General Directorate of Environmental Management under Ministry of Environment and Forestry between 2007 and 2011. Since 2011; she has been working as division manager in the General Directorate of Water Management under the Ministry Agriculture and Forestry. She took part in the preparation of numerous projects and publications on the effects of climate change, water resources and adaptation to the changing climate.

# SU KAYNAKLARI YÖNETİMİNDE HAVZA ÖLÇEKLİ FAALİYETLER

# BASIN SCALE ACTIVITIES IN WATER RESOURCES MANAGEMENT

*Taner KİMENÇE*

DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch08

# SU KAYNAKLARI YÖNETİMİNDE HAVZA ÖLÇEKLİ FAALİYETLER

***Taner KİMENÇE***
*Tarım ve Orman Bakanlığı*
*Su Yönetimi Genel Müdürlüğü*

**Özet**

Su kaynaklarına olan talebin giderek artması, mevcut su kaynaklarının hem kalite hem de miktarının korunmasını dikkate alarak bütüncül, etkin ve verimli bir şekilde yönetilmesini zaruri hale getirmektedir. Bu sebeple, Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü tarafından Türkiye'de 11 havza için Nehir Havzası Yönetim Planı (NHYP), 6 havza için Sektörel Su Tahsis Planları (SSTP) ve 25 içme suyu kaynağı için İçme Suyu Havza Koruma Planları hazırlanmış olup tüm havzalar için tamamlanması hedeflenmektedir. Bu kapsamda, bu çalışma; Nehir Havza Yönetim Planları, Sektörel Su Tahsisi Planları ve İçme Suyu Koruma Planları kapsamında yapılan faaliyetler ve Su Yönetimi Koordinasyon Kurulu ile planların nasıl uygulandığına ve Havza Yönetim Heyetleriyle havzalardaki durumun takibinin nasıl sağlandığına ilişkin bir inceleme sunmaktadır. Bu planlar; su kaynakları üzerindeki insani, endüstriyel, tarımsal ve diğer kirletici unsurların azaltılmasını ve önlenmesini, bu sayede su kaynaklarının kalitesinin korunmasına ve "iyi" su durumuna erişilmesini sağlamaktadır. Yine bu planlar; su kaynaklarının tüm canlıların, insani tüketimin ve ekonomik üretimde bulunan sektörlerin ihtiyaçları dikkate alınarak ve israfı önlenerek, adil, hakkaniyetli ve sürdürülebilir bir şekilde kullanılmasına hizmet etmektedir. Havza ve içme suyu havzası ölçeğinde su yönetimi ve planlama yaklaşımları, paydaş katılımını içeren uygulama ve takip mekanizmalarıyla desteklenmektedir.

***Anahtar Kelimeler***
*Su kaynakları yönetimi, Havza, Havza ölçekli planlar*

# BASIN SCALE ACTIVITIES IN WATER RESOURCES MANAGEMENT

***Taner KİMENÇE***
*Ministry of Agriculture and Forestry*
*General Directorate of Water Management*

**Abstract**

The growing demand for water resources highlights the necessity of managing existing water resources in a comprehensive, efficient, and effective manner, while considering the protection of both water quality and quantity. To this end, the General Directorate of Water Management, Ministry of Agriculture and Forestry in Türkiye, has prepared River Basin Management Plans (RBMPs) for 11 river basins, Sectoral Water Allocation Plans (SWAPs) for 6 river basins, and Drinking Water Basin Protection Plans for 25 drinking water sources. The goal is to complete plans for all basins. This study provides a review of the activities carried out within the scope of River Basin Management Plans, Sectoral Water Allocation Plans, and Drinking Water Protection Plans. It also highlights how these plans were put into practice with the Water Management Coordination Board and how the situation in the basins was monitored through Basin Management Committees. These plans aim to reduce and prevent pollutants caused by human, industrial, agricultural, and other activities, thereby maintaining the quality of water resources and achieving "good" water status. Moreover, they promote the fair, equitable, and sustainable use of water resources by considering the needs of all living beings, human consumption, and economic production sectors while minimizing waste. The implementation and follow-up mechanisms that support basin and drinking water basin-scale water management and planning approaches include stakeholder participation.

***Keywords***
*Water resources management, Basin, Basin scale plans*

## 1. Giriş

Canlıların varlığını sürdürmesi için en temel ihtiyaç sudur. Kullanılabilir ve temiz su kaynaklarına olan ihtiyaç ülkelerin gelişmesine paralel olarak sürekli artmaktadır. Bununla birlikte; hızlı nüfus artışı, refahın yükselmesinden dolayı insanların istek ve ihtiyaçlarının artması, sanayileşmenin etkisi ile dünyada ve Türkiye'de kişi başına düşen temiz su kaynağı miktarı hızla azalmaktadır (Su Yönetimi Genel Müdürlüğü [SYGM], 2023).

1960 yılında Türkiye nüfusu 27 milyon iken 2022 yılı itibarıyla yaklaşık 85 milyona, Dünya nüfusu ise 3 milyar iken bugüne geldiğimizde 8 milyara ulaşmış durumdadır. Fakat dünyadaki su kaynaklarının miktarı sabit olduğu için kişi başına düşen su miktarı hızla azalmaktadır.

Türkiye'de kişi başına düşen kullanılabilir su miktarı yıllık 1.310 $m^3$/yıl iken nüfus artışı ve sanayileşme hızı göz önüne alındığında 2040 yılında bu miktarın yıllık 1.120 $m^3$/yıl'a kadar düşeceği tahmin edilmektedir. Bu verilere göre, Türkiye "su stresi" altında olan bir ülke olup yapılan birçok bilimsel çalışmaya göre, yakın bir gelecekte ülkemizin "su kıtlığı" yaşayan bir ülke durumuna gelmesi öngörülmektedir (SYGM, 2023).

Su kaynaklarına olan talebin giderek artması, uzun yıllar ortalaması değişmeyen mevcut su kaynaklarının kalite ve miktarının korunmasını dikkate alan, bütüncül, etkin ve verimli bir şekilde yönetilmesini zaruri hale getirmektedir. Başka bir deyişle, yeryüzünde canlı hayatının devamının sağlanması için su kaynaklarının havza ölçeğinde yönetilmesi ve sürdürülebilir bir yaklaşımla kullanılması ve korunması gerekmektedir.

Bu amaç doğrultusunda; Türkiye, Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) tüm ekosistem unsurlarını doğrudan etkileyen su kaynaklarının bütüncül havza yönetimi anlayışı ile miktar ve kalite bakımından korunması ve sürdürülebilir, etkin ve verimli kullanımı ile aşırı iklim olaylarından ortaya çıkabilecek zararlarını en aza indirmek maksadıyla havza ölçekli yönetim planlarını (Nehir Havza Yönetimi, Sektörel Su Tahsisi, Taşkın Yönetimi ve Kuraklık Yönetimi Planları) ve İçme-Kullanma Suyu Havza Koruma Planlarını hazırlamaktadır.

Suyun doğal sınırı olan nehir havzası ölçeğinde yönetimi, ilgili ve sorumlu paydaşlardan oluşan Havza Yönetim Heyetleri ile birlikte koordinasyon ve işbirliği içerisinde Avrupa Birliği ve diğer uluslararası standartlar çerçevesinde hazırlanan planlar doğrultusunda yürütülmektedir.

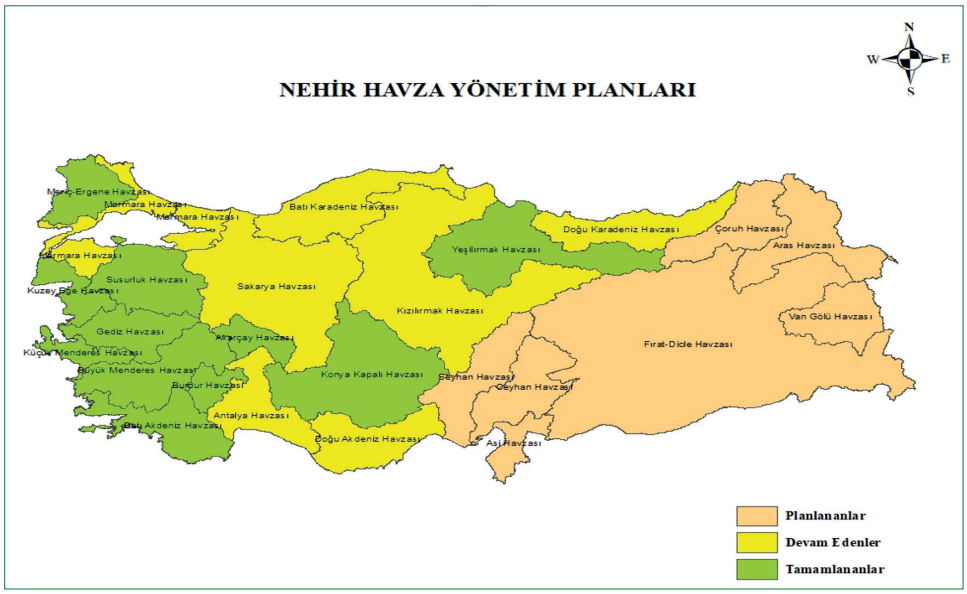
Bu makalede; Nehir Havza Yönetim Planları, Sektörel Su Tahsisi Planları ve İçme-Kullanma Suyu Havza Koruma Planları kapsamında yapılan çalışmalar ve Su Yönetimi Koordinasyon Kurulu ve Havza Yönetim Heyetleriyle bahse konu planların uygulamalarının nasıl yürütüldüğüne ilişkin bir değerlendirme sunulacaktır.

## 2. Havza Yönetim Planları

### 2.1. Nehir Havza Yönetim Planları

Türkiye'de 2013 yılında 25 havzada tamamlanan Havza Koruma Eylem Planları ile havzalardaki temel kirlilik kaynakları incelenmiş, su kalitesinin iyileştirilmesi için başta evsel ve endüstriyel atıksular ile katı atıklar olmak üzere havza bazında alınacak tedbirler belirlenmiştir. Söz konusu planlar temel olarak su kirliliğinin önlenmesini hedeflemekle birlikte iklim değişikliğine dirençliliğin sağlanması için su yapılarının yapılmasını ve ağaçlandırmayı da içeren 15 eylemden oluşmaktadır (SYGM, 2013). Hâlihazırda Havza Koruma Eylem Planları, Avrupa Birliği (AB) Çevre ve İklim Değişikliği Faslı'nın kapanış kriterini karşılayacak nitelikte olan Nehir Havza Yönetim Planlarına (NHYP) dönüştürülmektedir. AB Su Çerçeve Direktifi ile tam uyumlu Nehir Havza Yönetim Planlarında (NHYP) su miktarı ve kalitesi birlikte ele alınmakta, su kaynakları yönetilebilir en küçük ölçekte ele alınmakta, başka bir deyişle su kütlesi bazında çalışmalar yürütülmektedir. Su kütlelerinin drenaj alanındaki noktasal, yayılı ve hidromorfolojik bütün baskı ve etkiler belirlenmekte ve yapılan izleme çalışmaları (fiziko-kimyasal parametrelerin yanı sıra mikrokirleticiler ve sucul türlerin de izlenmesi) ile suyun miktar ve kalite durumu tespit edilmektedir. Akabinde, gerçekleştirilen modelleme çalışmasının desteği ile bütün su kütlelerinde iyi su durumuna ulaşılması maksadıyla alınması gerekli tedbirler, maliyetler ve bu tedbirlerden mesul kurumlar belirlenmektedir (WFD, 2023).

Havza esaslı planlamanın en üst seviyesi olan NHYP, 11 havza (Büyük Menderes, Susurluk, Konya, Meriç-Ergene, Gediz, Küçük Menderes, Kuzey Ege, Burdur, Batı Akdeniz, Akarçay ve Yeşilırmak) için tamamlanmıştır. Söz konusu yönetim planları Su Yönetimi Koordinasyon Kurulu'nun 2019, 2020 ve 2021 yıllarında gerçekleştirilen toplantılarında onaylanarak yürürlüğe girmiştir. Tamamlanan planlardaki tedbirlerin uygulanması Havza Yönetim Heyetleri ve İl Su Yönetimi Koordinasyon Kurulları marifetiyle takip edilmekte ve uygulamalara ilişkin ilerleme durumu Ulusal Su Bilgi Sistemi üzerinden 6 aylık dönemler halinde dijital ortamda raporlanmaktadır. Planların uygulanma durumuna ilişkin Havza Yönetim Heyetleri tarafından raporlanan hususlar Havza Yönetimi Merkez Kurulu ve Su Yönetimi Koordinasyon Kurulu tarafından üst düzeyde değerlendirilmektedir. 6 Havzada (Antalya, Batı Karadeniz, Doğu Akdeniz, Doğu Karadeniz, Kızılırmak ve Marmara) NHYP hazırlanmasına "6 Havzada Nehir Havza Yönetim Planlarının Hazırlanması Avrupa Birliği Teknik Yardım Projesi" kapsamında 13.09.2021 tarihinde başlanmıştır. Sakarya Havzasında NHYP hazırlanması süreci 02.04.2021 tarihinde ulusal bütçe kaynakları ile başlatılmıştır. Tamamlanan, devam eden ve hazırlanması planlanan NHYP'lerin güncel durumu Şekil 1'de verilmiştir.




***Şekil 1.*** *Nehir Havza Yönetim Planları (SYGM, 2023)*

NHYP'ler kapsamında her bir havzaya yönelik belirlenen tedbirler ve maliyetleri mesul kurumlar tarafından uygulanmaktadır. Bugüne kadar 11 havzaya ait NHYP'ler neticesinde her bir sektöre yönelik noktasal bazda olmak üzere toplam 18.257 tedbir belirlenmiş olup, söz konusu tebdirlerin yatırım maliyeti yaklaşık 40,5 milyar TL ve yıllık işletme-bakım maliyeti ise 1,8 milyar TL'dir.

Tamamlanan planların uygulanması 25 havzada kurulan Havza Yönetim Heyetleri ve 81 ilde teşkil edilen İl Su Yönetimi Koordinasyon Kurulları tarafından takip edilmekte ve uygulamalara ilişkin ilerleme durumu Ulusal Su Bilgi Sistemi üzerinden 6 aylık dönemler halinde dijital olarak raporlanmaktadır.

### 2.2. Sektörel Su Tahsis Planları

Sektörel Su Tahsis Planları (SSTP) kapsamında, havza ve sektörel alt havza ölçeğinde her sektörün (içme-kullanma, çevre, tarım, enerji, sanayi ve havzada öne çıkan diğer sektörler) ihtiyaç duyduğu suyun sosyal, ekonomik ve çevresel yönlerden analizi yapılmakta, belirlenen öncelikler doğrultusunda 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 ve 18 yıllık sektörel su dağıtım planlaması hazırlanmaktadır.

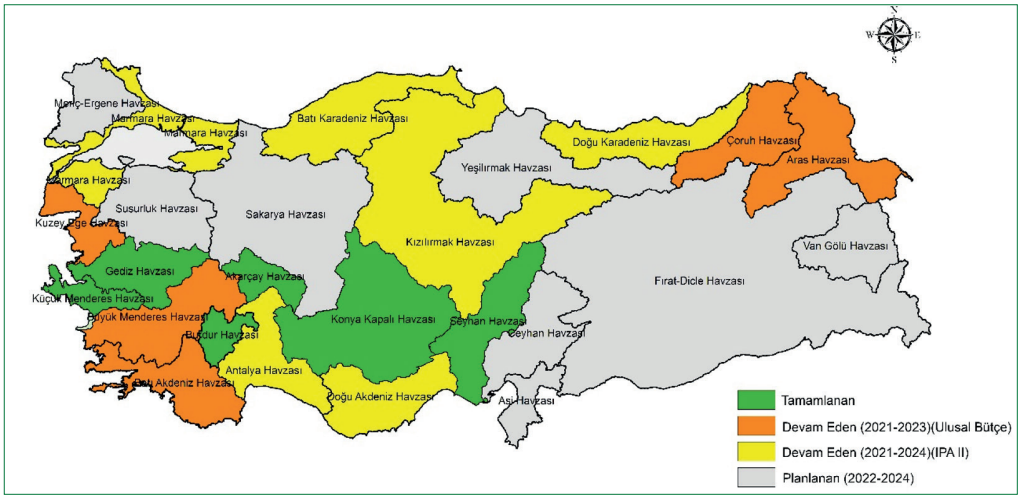
SSTP'ler, havzalardaki kurum/kuruluşlara, sektörlere ve ekosisteme normal durumda ve dört farklı kuraklık şartında (hafif kurak, orta kurak, şiddetli ve çok şiddetli kurak) su arzının sağlanması, sulak alanların korunması, çevresel akışın sürdürülebilirliğinin sağlanması, suların

verimsiz kullanımının önlenmesi ve yeniden su kullanımı ile ekosisteme daha çok su verilmesinin sağlanması hususunda destek olmaktadır. İklim değişikliğinin olası etkilerine uyum ve sektörlerin birbirine ve su kaynaklarına olan tesirleri dikkate alınarak su tahsisinin oluşturduğu ekonomik değerler tespit edilmektedir. Ülkemizde hizmete sunulan su potansiyelinin %77'sini kullanan tarım sektörü SSTP'lerde su kaynakları ve sosyo-ekonomik açıdan en önemli sektördür. Tarım sektörüne yönelik bitki deseni optimizasyonu ve sulama-zaman planlaması ile sektörün su ihtiyacı belirlenmektedir. Yaşanması öngörülen kuraklık koşullarında yeraltı ve yerüstü su kaynaklarından daha az su temin edecek üreticilerin üretime devam etmelerinin sağlanması, tarımsal net gelirin arttırılması ve milli politikalarla uyumlu önlemlerin alınması hususunda yol haritası belirlenmektedir.

- **Mevcut Durum Analizi:** Havzanın coğrafi konumu, idari yapılanması, fiziki yapısı, hidrojeolojik, ekolojik, iklim ve sosyo-ekonomik özellikleri belirlenmekte, nüfus analizleri yapılmakta, su potansiyeli ve sektörlerin su kullanımları, su kaynaklarının kalitesi ve havzadaki diğer planlama çalışmaları tespit edilmektedir.
- **Sektörel Su Talepleri Analizi:** Havzadaki tüm sektörlerin geleceğe yönelik su ihtiyaçları tespit edilmektedir. Ayrıca tüm sektörlerin mevcut ve gelecekteki su kullanımları doğrultusunda ekonomik analizleri yapılmaktadır.
- **Tahsis Modellemesi:** Projeksiyon yıllarına ilişkin normal durum ve dört farklı kuraklık durumu (hafif, orta, şiddetli ve çok şiddetli) için su tahsis senaryoları oluşturulmaktadır.
- **Sektörel Su Tahsis Planı:** Analiz çalışmalarından elde edilen tüm fiziki, hidrolojik, ekolojik, sosyo-ekonomik, kalite ve miktar verileri değerlendirilmekte; sosyal-ekolojik-ekonomik durum göz önüne alınarak havza su tahsis planı hazırlanmaktadır.
- **Sektörel Su Tahsis Eylem Planı:** Su Tahsis Planı'nın uygulanması ve takibine yönelik ilgili kurum ve kuruluşların yetki ve sorumluluklarının belirlendiği Eylem Planı hazırlanmaktadır.
- **Sektörel Su Tahsis Planı Haritaları:** CBS ortamında üretilen tüm vektör, raster ve tablosal veriler haritalanmaktadır.

SYGM tarafından 6 havzada (Seyhan, Akarçay, Konya, Gediz, Küçük Menderes ve Burdur) çalışmalar tamamlanmış, Su Tahsis Planları hazırlanmıştır. 11 havzada ise çalışmalar devam etmekte olup; 5 havza (Kuzey Ege, Büyük Menderes, Batı Akdeniz, Aras ve Çoruh Havzaları) için ulusal bütçeli projeler, 6 Havza (Antalya, Doğu Akdeniz, Batı Karadeniz, Doğu Karadeniz, Marmara ve Kızılırmak) için ise AB Teknik Yardım Projesi yürütülmektedir. SSTP'lerin güncel durumu Şekil 2'de yer almaktadır.

Su Yönetimi Koordinasyon Kurulu tarafından onaylanan Bakanlık Genelgeleri ile yürürlüğe giren Sektörel Su Tahsisi Eylem Planlarında her sektör için sorumlu ve ilgili kurum ve kuruluşların eylemleri tanımlanmakta olup kurumlardan alınan yıllık raporlama bilgileri ile eylemlerin takibi yapılmaktadır.




***Şekil 2.*** *Su Tahsis Planı Projeleri (SYGM, 2023)*

6 havzada tamamlanan tahsis planlaması sonucunda 8 milyar $m^3$ mertebesinde kullanılan su ile yaklaşık 11,2 milyar TL gelir elde edilebildiği tespit edilmiş, tahsis planlarına uygun hareket edilmesi halinde ise 7,8 milyar $m^3$ su ile 18,4 milyar TL gelir elde edilebileceği öngörülmüştür. Bu kapsamda, su tahsis planlarının uygulanmasının tüm sektörler bakımından önem arz ettiği değerlendirilmekte olup, uygulanmanın takibinin kolaylaştırılmasına yönelik teknolojik araçlardan daha fazla yararlanılmasına yönelik çalışmalar arttırılacaktır (SYGM, 2023).

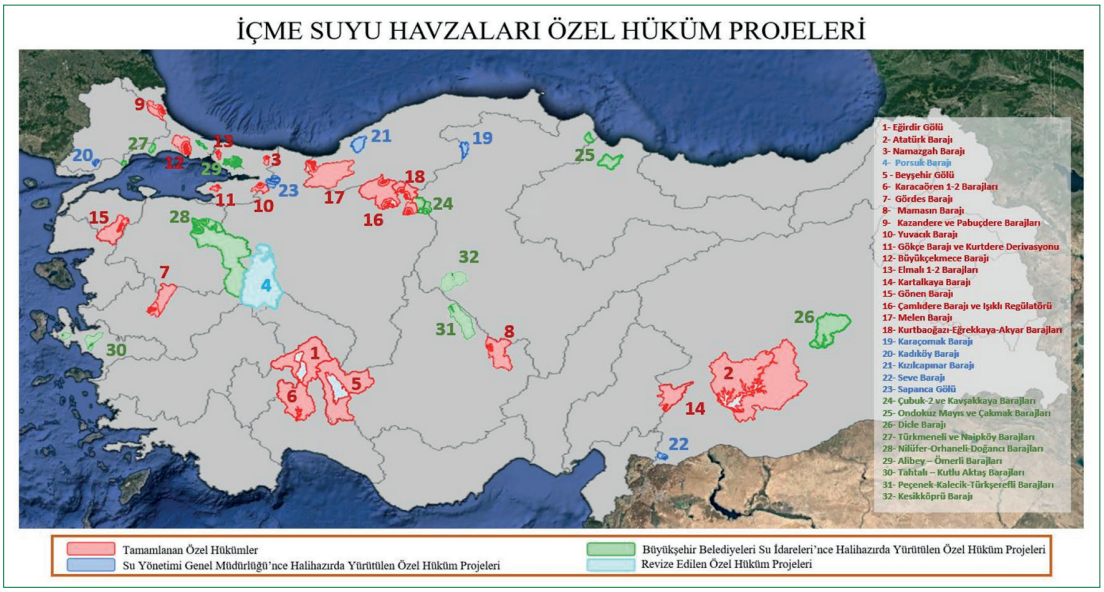
### 2.3. İçme-Kullanma Suyu Havza Koruma Planları

Türkiye'de içmesuyu temin edilen ve edilmesi planlanan 513 su kaynağı bulunmaktadır. *Hâlihazırda ise işletmede olan 168 adet içme suyu kaynağı (*doğal göl, gölet ve baraj*) bulunmaktadır.* Bu kaynakların, 91 tanesi Büyükşehir Belediyelerinin sorumluluğundadır.

Bahse konu kaynakların kalitesinin ve miktarının korunmasına ve iyileştirilmesine ilişkin usul ve esasları düzenlemek maksadıyla İçme-Kullanma Suyu Havzalarının Korunmasına Dair Yönetmelik 28.10.2017 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Söz konusu Yönetmelik kapsamında, içme suyu kaynaklarının havzalarında uyulması gereken genel esaslar ile koruma alanları belirlenmiş olup; koruma alanlarındaki kirletme yasakları ile yapılaşma koşulları hüküm altına alınmıştır. Yönetmelik uyarınca içme-kullanma suyu temin edilen tüm yerüstü suyu kaynakları için içme-kullanma suyu havzaları koruma planlarının hazırlanması gerekmektedir (SYGM, 2023).

İçme-kullanma suyu planları ile havzanın fiziki, jeolojik, hidrolojik, ekolojik ve sosyo-ekonomik özelliklerinin bilimsel verilere dayalı olarak tespit edilerek havzaya özgü koruma alanlarının ve esaslarının tespit edilmesi amaçlanmaktır. Bahse konu planların hazırlanması ile içme suyu kaynaklarının kalitesi ve miktarının havza bazında iyileştirilmesi ve sürdürülebilir su kullanımı sağlanabilecektir (SYGM, 2023).

SYGM uhdesinde ve koordinasyonunda 25 adet içme-kullanma suyu kaynağı (Eğridir Gölü, Atatürk Barajı, Porsuk Barajı, Namazgâh Barajı, Beyşehir Gölü, Karacaören 1-2 Barajları, Gördes Barajı, Mamasın Barajı, Kazandere ve Pabuçdere Barajları, Yuvacık Barajı, Gökçe Barajı, Büyükçekmece Barajı, Elmalı 1-2 Barajları, Kartalkaya Barajı, Gönen Barajı - Kumköy Regülatörü, Çamlıdere Barajı - Işıklı Regülatörü, Melen Barajı ile Kurtboğazı-Eğrekkaya-Akyar Barajları) için 19 adet içme suyu koruma planı yürürlüğe girmiştir. Tamamlanan ve devam eden Özel Hüküm çalışmalarının güncel durumu Şekil 3'de verilmiştir.




***Şekil 3.*** *İçme-Kullanma Suyu Havzaları Özel Hüküm Projeleri (SYGM, 2023)*

Bununla birlikte, çalışmaları devam eden, Karaçomak Barajı (Kastamonu), Kızılcapınar Barajı (Zonguldak), Kadıköy Barajı (Edirne), Seve Barajı (Kilis) ve Sapanca Gölü'ne (Sakarya ve Kocaeli) yönelik çalışmalar Genel Müdürlüğümüzce yürütülmektedir. Ayrıca, Çubuk-2 ve Kavşakkaya Barajları, Çınarcık-Nilüfer-Doğancı Barajları, Alibeyköy ve Ömerli Barajları, Naipköy Barajı, Türkmenli Göleti, Çakmak Barajı, 19 Mayıs Barajı, Kutlu Aktaş Barajı, Tahtalı Barajı ve Dicle Barajı için Ankara, Bursa, İstanbul, Tekirdağ, Samsun, İzmir ve Diyarbakır Büyükşehir Belediyeleri ile birlikte çalışmalar yürütülmektedir.

## 3. Su Yönetimi Koordinasyon Kurulu

Türkiye yarı kurak iklim bölgesinde yer aldığından, kullanılabilir su kalitesinin ve miktarının artırılması, su koruma ve kullanma dengesinin sürdürülebilirliğinin sağlanması büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla ve suyun iyi yönetimi açısından; bütün bakanlık, kurum ve kuruluşların koordinasyon ve işbirliği içerisinde ve ortak bir strateji çerçevesinde hareket etmeleri gerekmektedir (SYGM, 2023).

Su kaynaklarının kalite ve miktar açısından korunması maksadıyla havza bazında koruma ve kullanma dengesini esas alan yönetim planlarının hazırlanmasına, yatırımların gerçekleştirilmesine, kısa, orta ve uzun vadede ilgili kurumlarca, hukuki, idari ve teknik alanlarda atılması gereken adımların belirlenmesine ve Çevre ve İklim Değişikliği Faslı "Su Sektörü" kapanış kriterleri doğrultusunda koordinasyon ve iş birliğinin sağlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır (SYGM, 2023).

Su kaynaklarının bütüncül havza yönetimi anlayışı çerçevesinde korunması için gereken tedbirleri belirlemek, etkili bir su yönetimi için sektörler arası koordinasyonu, işbirliğini ve su yatırımlarının hızlandırılmasını sağlamak, ulusal ve uluslararası belgelerde yer alan hedeflerin gerçekleştirilmesi için strateji, plan ve politika geliştirmek, havza planlarında kamu kurum ve kuruluşlarınca yerine getirilmesi gereken hususların uygulanmasını değerlendirmek, üst düzeyde koordinasyonu ve işbirliğini sağlamak üzere "Su Yönetimi Koordinasyon Kurulu" (Kurul) 2012 yılında kurulmuştur (Su Yönetimi Koordinasyon Kurulu, 2021).

Kurulun, Tarım ve Orman Bakanının veya görevlendireceği bakan yardımcısının başkanlığında, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği, Dışişleri, Enerji ve Tabii Kaynaklar, İçişleri, Kültür ve Turizm, Sağlık, Sanayi ve Teknoloji, Ulaştırma ve Altyapı bakanlıklarının ilgili bakan yardımcıları veya görevlendirecekleri ilgili birimlerin genel müdürleri, Strateji ve Bütçe Başkanı veya görevlendireceği ilgili birimlerin genel müdürleri, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanı ve Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürü, Doğa Koruma ve Milli Parklar Genel Müdürü, Tarım Reformu Genel Müdürü, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürü, Balıkçılık ve Su Ürünleri Genel Müdürü, Bitkisel Üretim Genel Müdürü, Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürü, Avrupa Birliği ve Dış İlişkiler Genel Müdürü ile Devlet Su İşleri Genel Müdürü, Orman Genel Müdürü, Meteoroloji Genel Müdürü, Türkiye Su Enstitüsü Başkanı, İLBANK A.Ş. Genel Müdürü ve Türkiye Belediyeler Birliği Genel Sekreteri'nin katılımıyla oluşturulmuştur (Su Yönetimi Koordinasyon Kurulu, 2021).

Kurulun çalışma usul ve esasları, yıllık toplantı sayısı ile toplantı zamanları Kurul tarafından belirlenecek, sekretarya hizmetleri ve alınan kararların uygulanmasının takibi ve koordinasyonu Tarım ve Orman Bakanlığı SYGM tarafından yürütülmektedir. Kurul tarafından ihtiyaç duyulması halinde alt kurul, komite, danışma grupları ve geçici ve kalıcı çalışma grupları oluşturulabilmektedir. İlgili kamu kurum ve kuruluşlarının yanı sıra üniversiteler, sivil toplum kuruluşları, meslek birlikleri ve özel sektör temsilcileri Kurul toplantılarına davet edilebilmekte, alt kurul ve komite çalışmalarında yer alabilmektedir.

Havza ölçekli planları (Nehir Havza, Sektörel Su Tahsisi, Taşkın Yönetimi, Kuraklık Yönetimi) 2019, 2020 ve 2021 yıllarında gerçekleştirilen Su Yönetimi Koordinasyon Kurulu toplantılarında onaylanarak yürürlüğe girmiş olup, söz konusu planlarda yer alan tedbirlerin uygulanması takip edilmektedir.

## 4. Havza Yönetim Heyetleri ve İl Su Yönetimi Koordinasyon Kurulları

Havza koruma eylem, sektörel su tahsis, havza yönetim, havza taşkın yönetim, havza kuraklık yönetim gibi havza ölçeğinde suyla alakalı yapılan bütün planların hazırlanması, uygulanması, uygulamalarının takibi sürecinde kurumlar arası koordinasyonun sağlanması amacıyla; Havza Yönetimi Merkez Kurulu, Havza Yönetim Heyetleri ve İl Su Yönetimi Koordinasyon Kurullarının kurulması ve faaliyetlerini sürdürmesine ilişkin usul ve esaslar "Havza Yönetimi Merkez Kurulu, Havza Yönetim Heyetleri ve İl Su Yönetimi Koordinasyon Kurullarının Teşekkülü, Görevleri, Çalışma Usul ve Esaslarına Dair Tebliğ" ile düzenlenmiştir (Havza Yönetim Heyetleri, 2019).

"Havza Yönetim Heyetlerinin Teşekkülü, Görevleri, Çalışma Usul ve Esasları Hakkında Tebliğ"in 18.06.2013 tarihli ve 28681 sayılı Resmi Gazete'de yayımlanması ile Havza Yönetim Heyetleri (HYH) 2013 yılından itibaren, Tebliğin 20.05.2015 tarihinde revize edilmesiyle teşkil edilen İl Su Yönetimi Koordinasyon Kurulları (İSYKK) 2015 yılından itibaren faaliyetlerini sürdürmektedir. Havza Yönetim Heyetlerinin toplantılarına ilişkin görsel Şekil 4'te, Havza Heyetleri/Kurullarına ait görsel ise Şekil 5'te yer almaktadır.



***Şekil 4.*** *Havza Heyetleri / Kurulları Toplantıları (SYGM, 2023)*




***Şekil 5.*** *Havza Heyetleri / Kurulları (SYGM, 2023)*

## 5. Sonuç ve Değerlendirme

Yeryüzünde canlı hayatının devamının sağlanması için su kaynaklarımızın sürdürülebilir bir yaklaşımla koruması ve havza ölçeğinde yönetilmesi gerekmektedir. Politika ve strateji oluşturma, envanter, izleme, planlama, uygulama, denetim, yaptırım ve raporlama gibi unsurları içeren su kaynakları yönetiminin, Ülkemizde bu aşamaları içeren yalın bir yapıya kavuşturulması önem arz etmektedir. Su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı ve korunmasında doğru veri ile politika ve stratejilere uygun planlama çalışmalarının yapılması elzemdir. Bu amaç doğrultusunda, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü; su kaynaklarının kalite ve miktar olarak, suyu ilgilendiren bütün kurum ve kuruluşlarımızla koordinasyon ve işbirliği içerisinde yönetilmesi hususunda çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda, Nehir Havza Yönetim Planları, Sektörel Su Tahsis Planları ve İçme Suyu Havza Koruma Planları gibi havza ölçekli yönetim planları hazırlanmaktadır.

Detaylı kalite ve miktar analizleri, yüksek düzeyde bilimsel çalışma ve iklim değişikliği ile ilgili tahminler dikkate alınarak hazırlanan planlarda, ülkemiz su kaynaklarının geleceği için politika ve stratejilerle uyumlu tedbirler belirlenmektedir.

Su kaynaklarımızın sürdürülebilir kullanımı için havza ölçekli yönetim planlarında yer alan tedbirlerin uygulanmalı, tedbirlerin ve eylemlerin uygulanmasına dair kaydedilen gelişmelerin takibi için bilgi akışının sürekliliği sağlanmalı, uygulamada kaydedilen gelişmeler detaylı bir şekilde değerlendirilmeli ve su yönetimi ile ilgili aksama yaşanan hususlarda ilgili kurum ve kuruluşlar arasında gerekli koordinasyon sağlanarak darboğazların aşılması gerekmektedir.

Havza ölçeğinde çözüme ulaştırılamayan sorunlar ile çözüm bekleyen konular için İl Su Yönetim Koordinasyon Kurulları, Havza Yönetim Heyetleri ve Su Yönetimi Koordinasyon Kurulu'ndan en etkin şekilde faydalanılmalıdır.

## 6. Kaynaklar / References

Havza Yönetimi Merkez Kurulu, Havza Yönetim Heyetleri ve İl Su Yönetimi Koordinasyon Kurullarının Teşekkülü, Görevleri, Çalışma Usul ve Esaslarına Dair Tebliğ (2019). Erişim adresi: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2019/01/20190118-8.htm Gönderme (Havza Yönetim Heyetleri, 2019) E.T. 08.05.2023

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, (2013). Strateji ve Eylem Planları. Erişim adresi: https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Link/7/Strateji-Ve-Eylem-Planlari E.T. 08.05.2023.

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, (2023). Erişim adresi: https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM E.T. 08.05.2023

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, (2023). Sektörel Su Tahsis Planları. Erişim adresi: https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=10 E.T. 08.05.2023.

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, (2023). İçme Suyu Koruma Planları. Erişim adresi: https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Sayfalar/Detay.aspx?SayfaId=12 E.T. 08.05.2023.

Su Yönetimi Koordinasyon Kurulu 2021/17 Genelgesi (2021). Erişim adresi: https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/08/20210806-13.pdf Gönderme (Su Yönetimi Koordinasyon Kurulu, 2021) E.T. 08.05.2023.

Water Framework Directive, (2023). Overview of Water Framework Directive. Erişim adresi: https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en E.T. 08.05.2023.

## Yazar Hakkında / About Author

**Taner KİMENÇE | Tarım ve Orman Bakanlığı |**
**taner.kimence[at]tarimorman.gov.tr | ORCID: 0000-0002-6943-0477**

13.04.1978 tarihinde Ağrı'nın Hamur ilçesinde doğmuş olup, aslen Ardahan'lıdır. Kabataş Erkek Lisesinden 1994 yılında, İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümünden 1998 yılında mezun oldu. Yüksek Lisansını, İstanbul Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünde 2002 yılında tamamladı. Üniversite öğreniminden itibaren 1994-2002 yılları arasında İstanbul'da çeşitli Mühendislik Firmalarında projeci ve çevre mühendisi olarak çalıştı. Askerlik hizmetini Ağustos 2002-Mart 2003 tarihleri arasında Ankara'da yaptı. Temmuz 2003-Ocak 2004 tarihleri arasında İstanbul'da özel bir firma da çalıştıktan sonra 2004 yılında DSİ Genel Müdürlüğüne atandı ve burada 7 yıl görev yaptı. 2011 yılında Bakanlıkların yeniden teşkilatlanması neticesinde kurulan Orman ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü Su Hukuku ve Politikası Daire Başkanlığında Şube Müdürü olarak görev yaptı. Akabinde 2014 yılı Ocak ayında Havza Yönetimi Daire Başkanlığında uzman yardımcısı olarak görevine devam etti. 2014 yılının Haziran ayında Su Yönetimi Genel Müdürlüğünde Havza Yönetimi Daire Başkanı olarak atanan Taner KİMENÇE halen bu görevini sürdürmektedir. Ayrıca 2016-2019 yılları arasında Su Hukuku ve Politikası Daire Başkanlığı görevini vekaleten yürütmüştür. Taner KİMENÇE evli ve iki çocuk babasıdır.

**Taner KİMENÇE | Ministry of Agriculture and Forestry |**
**taner.kimence[at]tarimorman.gov.tr | ORCID: 0000-0002-6943-0477**

He was born on 13th of April, 1978 in Hamur district of Ağrı province. He graduated from Kabataş Boys High School in 1994 and from Istanbul Technical University, Department of Environmental Engineering in 1998. He completed his master's degree at Istanbul Technical University, Department of Industrial Engineering in 2002. During his university education, he worked as a project designer and environmental engineer in various engineering companies in Istanbul between 1994 and 2002. He did his military service in Ankara between August, 2002 and March, 2003. After working in environmental engineering company in Istanbul between July, 2003 and January, 2004, he was appointed to the General Directorate of State Hydraulic Works (DSI) in 2004 and worked there for 7 years. He worked as Branch Manager in the Department of Water Law and Policy in the General Directorate of Water Management of the Ministry of Forestry and Water Affairs, between September 2011 and January, 2014. He has been appointed as the Head of the River Basin Management Department in the General Directorate of Water Management in June 2014. In addition, he served as Acting Head of Water Law and Policy Department between 2016 and 2019. He is married and has two children.

# YEREL YÖNETİMLERİN SU PLANLAMASINDA İKLİM DEĞİŞİMİNİN ROLÜ

# THE ROLE OF CLIMATE CHANGE IN LOCAL GOVERNMENTS' WATER PLANNING

*İzzet ÖZTÜRK*
*Gökhan CÜCELOĞLU*
*Elif Zeynep DENERİ*

 DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch09

# YEREL YÖNETİMLERİN SU PLANLAMASINDA İKLİM DEĞİŞİMİNİN ROLÜ

***İzzet ÖZTÜRK***
*İstanbul Teknik Üniversitesi*

***Gökhan CÜCELOĞLU***
*Gebze Teknik Üniversitesi*

***Elif Zeynep DENERİ***
*İstanbul Teknik Üniversitesi*

**Özet**

Bu çalışma, iklim değişiminden etkilenen sektörlerden biri olan su, atık su ve yağmur suyu yönetimi (entegre su yönetimi) sektörü için farklı düzeylerde yönetim birimleri tarafından alınması önerilen önlemleri sunmaktadır. Bu çalışma kapsamında öncelikle su temini (arzı) ile iklim değişimi etkileşimi incelenmiştir. Bu kapsamda Orman ve Su İşleri Bakanlığı (şimdiki Tarım ve Orman Bakanlığı) Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) tarafından Akarsu Mühendislik-İO Çevre ortak girişimine 2015-2100 dönemi için Türkiye geneli ve 25 akarsu havzası için yaptırılan iklim modellemesi ve hidrolojik modelleme projesi çıktıları özetlenmiştir. Bu kapsamda Türkiye için net su fazlası/açığı tahminleri verilmiş ayrıca Marmara ve Konya Kapalı Havzaları için elde edilen Hidrolojik Model projeksiyon sonuçları özetlenmiştir. Daha sonra, Bütünleşik Su Yönetimi'nin kent ölçeğinde iklim değişimi eylem planındaki yeri ve önemi, İstanbul Örneği ile sunulmuştur. Bu çerçevede, İstanbul ve yakın çevresindeki su kaynakları için yürütülmüş olan, yüksek çözünürlüklü iklim verileri (~0,25°) ile gerçekleştirilen kapsamlı hidrolojik modelleme çalışması çıktıları özetlenmiştir. Ardından Su ve Kanalizasyon İdareleri (SUKİ) Master Planları'nda kritik önem arz eden İklim Değişimine dirençli su yönetimi yaklaşımına değinilmiş; su arzının artırılması, su kayıp kaçaklarının azaltılması, daha etkin talep yönetimi ve kademeli su tarifesi uygulanması ile su temini (arzı) güvenliğinin sağlanmasına yönelik çözümler sunulmuştur. Bütünleşik atıksu yönetimi yaklaşımı ile atıksu arıtma tesislerinin enerji ihtiyacının tamamının kendi bünyelerinde üretilen enerjiden sağlanabileceği (enerji pozitif tesis) sistemler açıklanmış; yağmursuyu drenajı (gri altyapı) ve sürdürülebilir yeşil drenaj sistemleri, yağmursuyu drenajı ve taşkın yönetimi bölümünde verilmiştir. Değerlendirme ve öneriler bölümünde ise, Su Sektörü ve SUKİ'lerin yönetim birimi bazında alması tavsiye edilen tedbirler özetlenmiştir.

***Anahtar Kelimeler***
*İklim değişimi, Yerel yönetimler, Su planlaması, Bütünleşik su yönetimi, Sürdürülebilir kentsel drenaj, Atıksu rafinerisi*

# THE ROLE OF CLIMATE CHANGE IN LOCAL GOVERNMENTS' WATER PLANNING

***İzzet ÖZTÜRK***
*İstanbul Technical University*

***Gökhan CÜCELOĞLU***
*Gebze Technical University*

***Elif Zeynep DENERİ***
*İstanbul Technical University*

**Abstract**

This study presents the recommended measures to be taken by management units at different levels for the water, wastewater and rainwater management (integrated water management) sector, which is one of the sectors affected by climate change. In the scope of this study, firstly, the interaction of water supply (offer) and climate change was examined. In this context, the outputs of climate modeling and hydrological modeling project were summarized for Turkiye and 25 river basins which are prepared by the Ministry of Forestry and Water Affairs (currently Ministry of Agriculture and Forestry) Water Management General Directorate (SYGM) with the joint venture of Akarsu Engineering - İO Environment for the period 2015-2100. In this context, net water surplus/deficit estimations for Turkiye were given and the hydrological model projection results obtained for Marmara and Konya Closed Basins were summarized. Then, the place and importance of Integrated Water Management at the urban scale in climate change action plans were presented with the example of Istanbul. In this context, the outputs of the comprehensive hydrological modeling study carried out with high-resolution climate data (~0.25°) for water resources in Istanbul and its surroundings were summarized. Then, the climate change-resistant water management approach, which is of critical importance in the Water and Sewerage Administrations' (SUKI) Master Plans, was mentioned. Solutions for increasing the water supply, reducing the leakage of water, providing more effective demand management and gradual water tariff implementation and ensuring water supply (offer) security were presented. With the integrated wastewater management approach, systems in which all the energy requirements of wastewater treatment plants can be met from the energy produced within their own structure (energy-positive plant) have been explained; stormwater drainage (grey infrastructure) and sustainable green drainage systems were given. In the evaluation and recommendations section, the recommended measures to be taken by the Water Sector and SUKI based on management units are summarized.

***Keywords***
*Climate change, Local governments, Water planning, Integrated water management, Sustainable urban drainage, Wastewater refinery*

## 1. Giriş

İklim değişimi; uzun süreli hava olaylarında meydana gelen ani, şiddetli ve önemli değişimler olarak tanımlanmaktadır. İklim değişimi, antropogenik faaliyetlerdeki artış sebebiyle içinde bulunduğumuz yüzyılda öne çıkan bir problem halini almıştır. Hükümetlerarası İklim Değişimi Paneli (IPCC) Beşinci Değerlendirme Raporu'na göre insan faaliyetlerine bağlı sera gazı konsantrasyonlarında ortaya çıkan artış, 20. yüzyılın ortalarından itibaren atmosferde meydana gelen ısınmanın en önemli sebeplerinden biridir. (IPPC, 2014). Bu yüzden, küresel sıcaklık son 150 yılda yaklaşık 0,8°C yükselmiş olup günümüzde de yükselmeye devam etmektedir. Dünyanın pek çok bölgesinde yağış ve su kaynaklarının dağılımdaki değişikliklerin sebebi artan sera gazı emisyonlarından kaynaklanan küresel ısınmadır. Bu durum küresel ve bölgesel hidrolojik döngülerin iklim değişiminden büyük ölçüde etkilenmesi ile sonuçlanmıştır (Brutsaert & Parlange, 1998; Solomon, vd., (2007); Hagemann, vd., 2013; Dufresne, vd., 2013). Sanayileşme öncesine göre sıcaklıklardaki 2°C'lik artışın aşılması durumunda insan ve doğa için küresel ölçekte geri döndürülemez risklerin ortaya çıkacağı öngörülmektedir (OSİB, 2016).

İklim değişiminin Türkiye üzerindeki muhtemel etkileri, çeşitli yönleri ile farklı çalışmalarda değerlendirilmiştir (Önol vd., 2006; Önal & Semazzi, 2009) (Bozkurt vd., 2011; Demir, 2011; Önal, 2012; Ünal vd., 2012; Toros, 2012; Şen vd., 2013; Kurnaz, 2014). (Karaca vd., 2000) (Ünal vd., 2013). Konu ile ilgili analizler ve geleceğe yönelik tahmin çalışmalarının büyük çoğunluğunda en önemli iklim parametreleri olan sıcaklık, yağış ve ekstrem olaylar üzerine odaklanılmıştır. İklim projeksiyonları, sıcaklığın içinde bulunduğumuz yüzyılın sonuna kadar (2010-2100 dönemi) çok daha artacağını ortaya koymaktadır. Bu sebeple Güneydoğu Avrupa ve Doğu Akdeniz bölgesinde yer alan Türkiye'de; iklim değişiminin su kaynaklarına etkisini değerlendirmek için geleceğe yönelik projeksiyonların gelişmiş modellerle farklı senaryolar için gerçekleştirilmesi ve yüksek çözünürlüklü simülasyonlarla elde edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmada öncelikle Kentsel Su Temini (arzı) ile iklim değişimi etkileşimi incelenmiştir. Bu kapsamda; ilk olarak, Orman ve Su İşleri Bakanlığı (OSİB) (şimdiki Tarım ve Orman Bakanlığı) Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM)'nce Akarsu Mühendislik-İO Çevre Ortak girişimine, İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Desteği ile yaptırılan, Türkiye geneli ve 25 akarsu havzasının her biri için 2015-2100 dönemini içine alan iklim modellemesi ve Hidrolojik Modelleme Projesi çıktıları özetlenmiştir (OSİB, 2016). Ardından; İstanbul ve civarındaki potansiyel su kaynakları (Marmara, İznik ve Büyük Melen (Batı Karadeniz)) alt havzaları için yakın tarihli bir doktora çalışması kapsamında yürütülen, yüksek çözünürlüklü İklim Modellemesi ve Hidrolojik Modelleme ile İstanbul'un su talebi projeksiyonları değerlendirilmiştir (Cüceloğlu, 2019). Daha sonra; İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi (İSKİ) Genel Müdürlüğü'nün yeni Su Yönetimi Master Planı'nda, İklim Değişimi'nin kentin 2023~2053 dönemi su temini planlaması üzerindeki etkiler ile ilgili yaklaşımı ele alınmıştır.

Çalışmanın, Su Kanalizasyon İdareleri'nin Bütünleşik Su, Atıksu ve Yağmursuyu Yönetimi Master Planlarında İklim Değişimi Etkilerinin ele alındığı üçüncü bölümünde ise; (i) Su Temini/arzı güvenliği (kuraklık ve talep yönetimi), (ii) Bütünleşik atıksu yönetimi (atıksu rafinerisi konsepti), (iii) Yağmursuyu drenajı ve taşkın yönetimi (sürdürülebilir kentsel drenaj seçenekleri, sünger şehirler ve yeşil/mavi dere koridorları) ve (iv) Kanalizasyon idarelerinde tam maliyet gerikazanımlı sürdürülebilir su-atıksu-yağmursuyu tarifesi hedef ve ilkeleri analiz edilmiştir. Dördüncü bölüm, bu konularla ilgili teknik, ekonomik ve idari sonuçlar ile bazı kritik önerilere ayrılmıştır.

## 2. Kentsel Su Temini (Arzı) ve İklim Değişimi Etkileşimi

### 2.1 Türkiye Geneli Ve 25 Su Havzasında 2015-2100 Dönemi İçin Yürütülen İklim Modellemesi Ve Hidrolojik Modelleme Çalışması Tahminleri

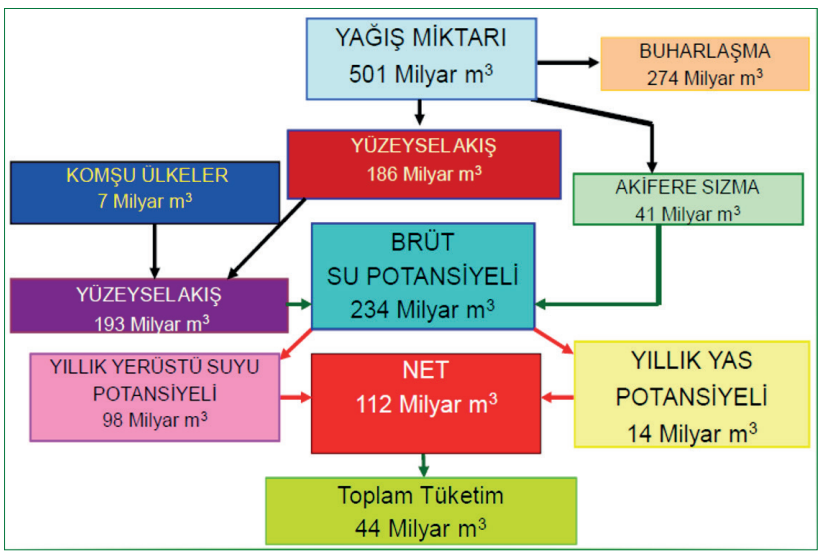
**İklim Modellemesi.** Türkiye'de iklim değişimi ve su kaynaklarına etkileri konusunda yapılan en kapsamlı çalışma olan "İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkileri Projesi"nde , iklim projeksiyonları kapsamında, IPCC'nin 5. Değerlendirme Raporu'nun tabanını oluşturan CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5) arşivinden seçilmiş üç küresel modelin (HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR ve CNRM-5.1) çıktıları ve RCP4.5 (iyimser senaryo) ve RCP8.5 (kötümser senaryo) emisyon salım (zorlama) senaryoları ile tüm Türkiye'yi kapsayacak şekilde RegCM4.3 bölgesel iklim modeli çalıştırılmıştır (OSİB, 2016).

Toplam 8 parametre ve ekstrem durumları temsil eden 17 iklim indisine ait projeksiyonlar tüm nehir havzaları (25 havza) ölçeğinde modellenmiş, incelenen parametrelerin 1971-2000 yılı simülasyonları olarak kabul edilen *referans dönemine* göre 2100 yılına kadar farkları, 10'ar ve 30'ar yıllık dönemler için mevsimlik ve yıllık ortalamalar halinde modelleme çalışmaları kapsamında hesaplanmıştır. Akarsu Mühendislik-İO Çevre Ortak girişimince İTÜ'nün Bilimsel desteği ile gerçekleştirilen bu projede ilk kez, Türkiye için 10x10 km çözünürlükte 3 küresel iklim modelinin 2015-2100 dönemi simülasyon sonuçları elde edilmiştir (OSİB, 2016).

*İklim değişimi projeksiyonları* kapsamında ilk aşamada referans periyodu için başlangıç ve sınır koşulları ile önce 50x50 km sonra 10x10 km çözünürlükte simülasyon yapılmış, ardından CMIP5 veri tabanından seçilen HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR ve CNRM-5.1 küresel iklim modellerinin 10x10 km çözünürlüğe sahip referans dönemi iklim simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Türkiye'ye özgü iklim simülasyonları, her üç küresel iklim modelinin 2100 yılında RCP4.5 ve RCP8.5 temsili konsantrasyon rotalarına dayanan simülasyonlar ile RegCM4.3 bölgesel iklim modeli ile 2015-2100 yılları arasında 10x10 km çözünürlükle elde edilmiştir (OSİB, 2016).

**Hidrolojik Modelleme.** Bu kapsamda, Türkiye'de ilk kez tüm nehir havzalarının su potansiyelleri WEAP (Water Evaluation and Planning System) destekli SWAT (Soil and Water Assessment Tool) yazılımı vasıtasıyla hesaplanmıştır. İklim modellerinin çıktılarıyla hidrolojik model çalıştırılarak, yağış değerleri akış değerlerine çevrilmiş, tüm havzalarda yüzey ve yeraltı su kaynaklarının mevcut ve projeksiyon dönemleri için su potansiyelleri tahmin edilmiştir (OSİB, 2016, Öztürk, 2020a).

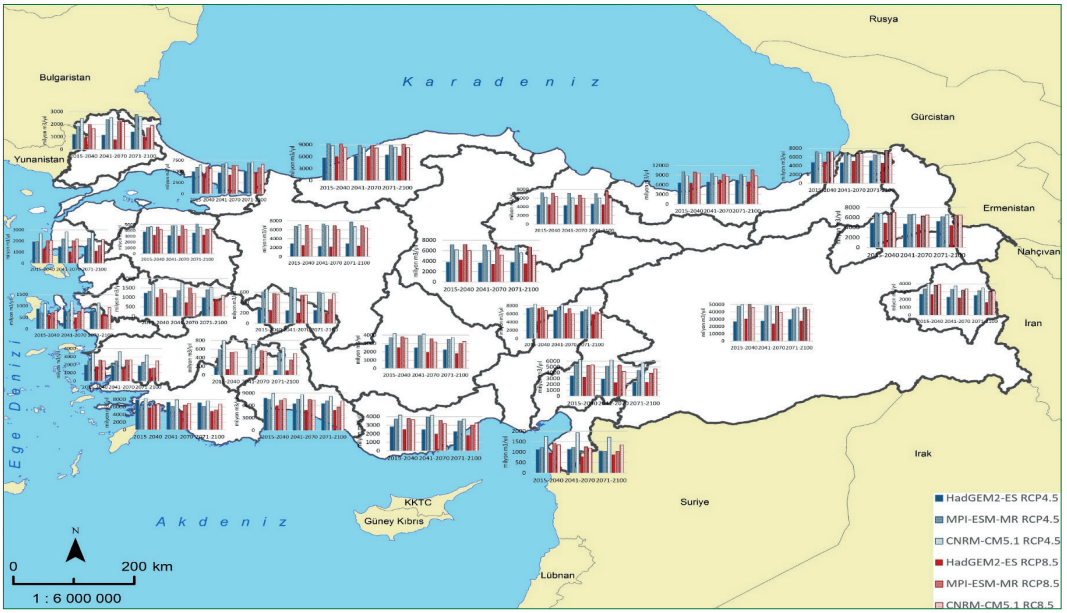
Devlet Su İşleri (DSİ) verilerine göre yurt içindeki akarsulardan 95 milyar $m^3$, komşu ülkelerden ülkemize ulaşan akarsulardan 3 milyar $m^3$ olmak üzere, Türkiye'deki kullanılabilir toplam yüzeysel su potansiyeli yılda ortalama 98 milyar $m^3$'e ulaşmaktadır. Ülkemizdeki yeraltı suyu potansiyeli ise 14 milyar $m^3$ olarak belirlenmiştir. Bu durumda, ülkemizin çeşitli amaçlara yönelik su kullanımında teknik ve ekonomik bakımdan kullanılabilir yerüstü ve yeraltı suyu potansiyeli yılda ortalama toplam 112 milyar $m^3$'e ulaşmakta olup, söz konusu miktarın 44 milyar $m^3$'ü kullanılmaktadır (Şekil 1. Türkiye'nin Su Potansiyeli ve Dağılımı (OSİB, 2016).).




***Şekil 1.*** *Türkiye'nin Su Potansiyeli ve Dağılımı (OSİB, 2016).*

İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkileri Projesi kapsamında ise, Türkiye'nin mevcut su potansiyeli yaklaşık 109 milyar $m^3$ olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamadan sonra, havza bazında suyu tüketecek temel sektörler belirlenmiştir. Söz konusu temel sektörler; içme ve kullanma suyu, sanayi suyu, sulama suyu ve ekosistem hizmetleri ihtiyacı olmak üzere 4 ana sektörden oluşmaktadır. Buna göre, havzalar bazındaki nüfus, endüstri ve tarım faaliyetlerinin yanında 2100 yılına dek ekosistem hizmetleri ihtiyaçlarındaki muhtemel değişimler de tahmin edilmiştir. Havzalar özelinde muhtemel su fazlası veya açığını tespit etmek için, havza bazlı nüfus artış eğilimleri ve havza özelinde bilinen önemli yatırım planlarının yanında, havzalardaki endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerin değişimleri ile ekosistem hizmetlerinin sürdürülebilirliği de ayrıca dikkate alınmıştır.

Türkiye'de toplam nehir akışlarının referans döneme göre azalacağı, söz konusu üç iklim modeli ve iki senaryo sonuçlarına bakıldığında ortaya çıkmaktadır. Hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryosu sonuçları için en düşük toplam akış tahminleri HadGEM2–ES modeli ile üretilmiştir (Öztürk, 2020a). Model tahminlerinin tamamı referans dönemi değerinden (~186.000 milyon $m^3$/yıl) düşük kalmaktadır. 30'ar yıllık ortalama tahminler referans döneme göre daha düşük kalmakla birlikte, her üç modelde aynı senaryo için 30 yıllık dönemlerdeki değişimlerin az olduğu görülmektedir (OSİB, 2016; Öztürk, 2020a). Her üç model için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarında, 25 havzada brüt su potansiyelinin 30 yıllık dönemlerdeki değişimleri Şekil 2. Türkiye Geneli için 25 Havzada İklim Projeksiyonları Senaryolarına göre 30'ar Yıllık Brüt Su Potansiyeli Haritası (OSİB, 2016).'de gösterilmiştir.




***Şekil 2.*** *Türkiye Geneli için 25 Havzada İklim Projeksiyonları Senaryolarına göre 30'ar Yıllık Brüt Su Potansiyeli Haritası (OSİB, 2016).*

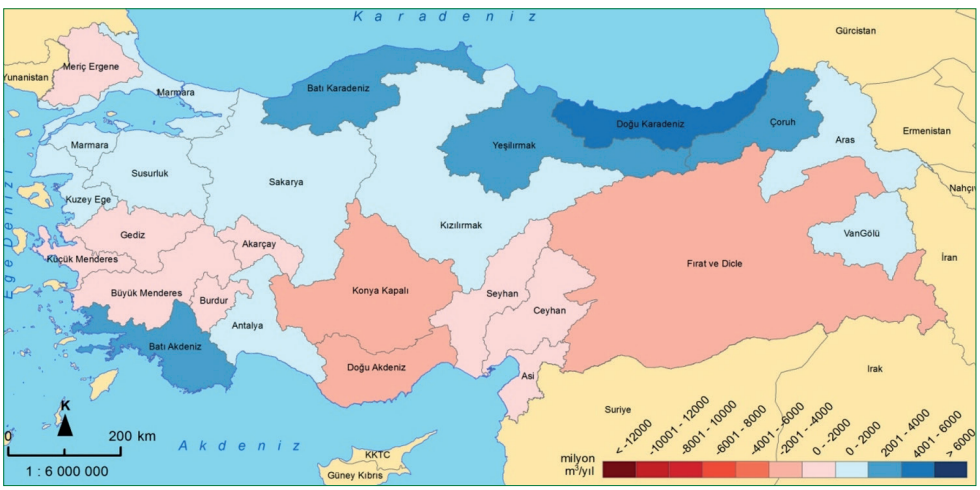
## 2.2. Türkiye için Net Su Açığı/Fazlası Tahminleri

Türkiye'de akarsu havzalarının 2015-2100 dönemi için net su açığı/fazlası durumu tematik harita formatında üç model ve iki senaryo için ayrı ayrı hazırlanmış olup, MPI-ESM-MR modeli RCP8.5 senaryosu ile aşağıda sunulmaktadır (Şekil 3. Türkiye Geneli için İklim Projeksiyonları MPI-ESM-MR RCP4.5 Senaryolarına göre Havza Bazlı Su Fazlası/Açığını Gösterir Tematik Harita (2015-2040) (OSİB, 2016) – Şekil 5. Türkiye Geneli için İklim Projeksiyonları MPI-ESM-MR RCP4.5 Senaryolarına göre Havza Bazlı Su Fazlası/Açığını Gösterir Tematik Harita (2071-2100) (OSİB, 2016)). Su fazlası/açığını gösteren tematik haritalar, gelecekte komşu havzalar arasında olası su transferini belirleme amacıyla da kullanılabilecektir. Bütün dönemlerde en kayda değer su açığının gözlenmesinin beklendiği havzalar ise genel itibariyle Fırat Dicle, Doğu Akdeniz ve Konya Kapalı Havzalarıdır.

MPI-ESM-MR modeli RCP4.5 senaryosuna göre, tüm dönemlerde su fazlası olan havzalar Doğu Karadeniz ve Çoruh Havzaları olarak ortaya çıkmaktadır. Bütün projeksiyon dönemleri için Marmara, Susurluk, Kuzey Ege, Batı Karadeniz, Yeşilırmak, Antalya, Aras ve Van Gölü Havzalarında öngörülen net su miktarlarının, tahmini su kullanımları için yeterli olduğu öngörülmektedir.




***Şekil 3.*** *Türkiye Geneli için İklim Projeksiyonları MPI-ESM-MR RCP4.5 Senaryolarına göre Havza Bazlı Su Fazlası/Açığını Gösterir Tematik Harita (2015-2040) (OSİB, 2016)*
*Fırat Nehri Alt Havzası için mansap ülkelerine su bırakma taahhüdü olan 500 $m^3/s$ dikkate alınmıştır. Dicle Nehri Alt Havzası için mansaba bırakılan 2011-2015 yılları arası ortalama debi değeri 342 $m^3/s$ dikkate alınmıştır.*




***Şekil 4.*** *Türkiye Geneli için İklim Projeksiyonları MPI-ESM-MR RCP4.5 Senaryolarına göre Havza Bazlı Su Fazlası/Açığını Gösterir Tematik Harita (2041-2070) (OSİB, 2016)*
*Fırat Nehri Alt Havzası için mansap ülkelerine su bırakma taahhüdü olan 500 $m^3/s$ dikkate alınmıştır. Dicle Nehri Alt Havzası için mansaba bırakılan 2011-2015 yılları arası ortalama debi değeri 342 $m^3/s$ dikkate alınmıştır.*




***Şekil 5.*** *Türkiye Geneli için İklim Projeksiyonları MPI-ESM-MR RCP4.5 Senaryolarına göre Havza Bazlı Su Fazlası/Açığını Gösterir Tematik Harita (2071-2100) (OSİB, 2016)*

*Fırat Nehri Havzası için mansap ülkelerine su bırakma taahhüttü olan 500 $m^3/s$ dikkate alınmıştır. Dicle Nehri Havzası için mansaba bırakılan 2011-2015 yılları arası ortalama debi değeri 342 $m^3/s$ dikkate alınmıştır.*

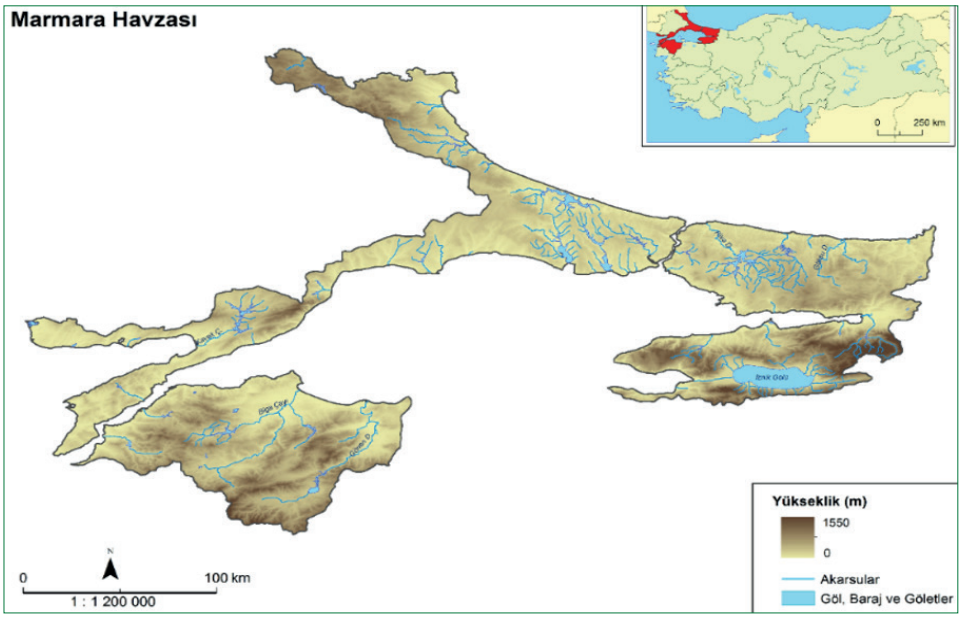
Projeksiyon dönemi başlangıcından itibaren Fırat-Dicle havzasında; özellikle 2041-2100 döneminde ise Doğu Akdeniz ve Konya Kapalı Havzaları'nda, önemli miktarlarda su açığı yaşanması beklenmektedir. Diğer havzalar için ise, tüm dönemlerde düşük mertebede su açıkları olacağı tahmin edilmektedir. 2041-2070 arası (orta dönem) dönem, Türkiye'de su mevcudiyeti açısından en kritik 30 yıllık projeksiyon dönemi olarak göze çarpmaktadır. RCP4.5 senaryoları ile HadGEM2-ES iklim modelinin RCP8.5 senaryoları büyük ölçüde paralel sonuçlar vermekte olup, daha kritik iklim şartları sebebiyle, RCP8.5 senaryolarında havzalar genelinde göreceli olarak bir miktar daha fazla su açığı öngörülmektedir (OSİB, 2016; Öztürk, 2020a).

Yukarıda Türkiye geneli ile ilgili çıktıları verilen İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkileri Projesi kapsamında incelenen 25 su havzasından ikisi olan Marmara ve Konya Kapalı havzaları için elde edilen projeksiyon sonuçları da aşağıda kısaca özetlenmiştir (OSİB, 2016).

## 3. Marmara Havzası

### 3.1. Havzanın Genel Özellikleri

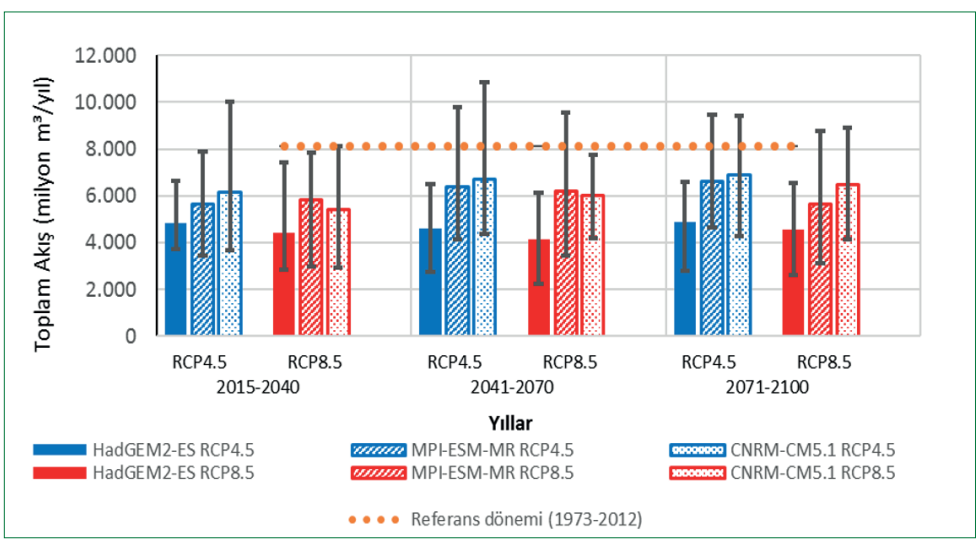
Marmara Denizi'ne dökülen Susurluk Nehri haricindeki tüm akarsuların yağış alanlarını kapsayan Marmara Havzası, Trakya'da Koru Dağı, Ganos Dağı ve Istıranca uzantıları, Anadolu'da kuzeyden itibaren Alem Dağı, Aydos Dağı, Kayalıdağ, Gökdağ, Avdan Dağı, Katırlı Dağı ile Kaz Dağı uzantıları ve Karadağ tarafından çevrelenmektedir. Marmara Havzası'nın fiziki haritası Şekil 6. Marmara Havzası Haritası (OSİB, 2016).'da görülmektedir.




***Şekil 6.*** *Marmara Havzası Haritası (OSİB, 2016).*

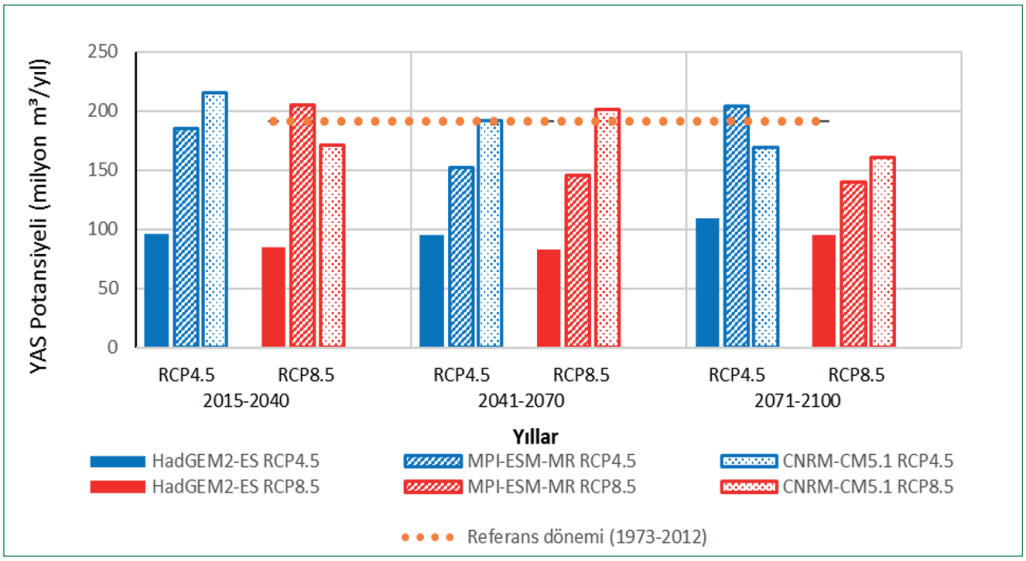
### 3.2. Toplam Akış

Projeksiyonlara göre Marmara Havzası'nda tahmin edilen 30 yıllık ortalama akışlar Şekil 7. Marmara Havzası İklim Değişikliği Projeksiyonlarına göre Tahmin Edilen Toplam Akış 30 Yıllık Ortalamaları (OSİB, 2016). ile gösterilmektedir.




***Şekil 7.*** *Marmara Havzası İklim Değişikliği Projeksiyonlarına göre Tahmin Edilen Toplam Akış 30 Yıllık Ortalamaları (OSİB, 2016).*

30'ar yıllık dönemlerin tümünde, modeller referans dönemi değerlerinin altında sonuçlar göstermektedir. Her iki senaryo sonuçlarına bakıldığında, 3 model arasında en düşük değerleri HadGEM2-ES modeli sonuçları vermektedir. Bu durumu benzer sonuçlar üreten MPI-ESM-MR ve CNRM-CM5.1 modelleri takip etmektedir. En yüksek sonuçlar CNRM-CM5.1 modeli RCP4.5 senaryosu ile 2071-2097 döneminde, en düşük sonuçlar ise HadGEM2-ES modeli RCP8.5 senaryosu ile 2041-2070 döneminde öngörülmektedir. 30'ar yıllık ortalamalara bakıldığında Marmara havzasında toplam akış değerinin ortalama %25, bazı dönemlerde ise %49'a varan oranlarda düşmesi beklenmektedir. (Şekil 8)




**Şekil 8.** *Marmara Havzası'nda İklim Değişikliği Projeksiyonlarına göre Tahmin Edilen YAS Potansiyelinin 30 Yıllık Ortalamaları (OSİB, 2016).*

### 3.3. Net YAS Potansiyeli

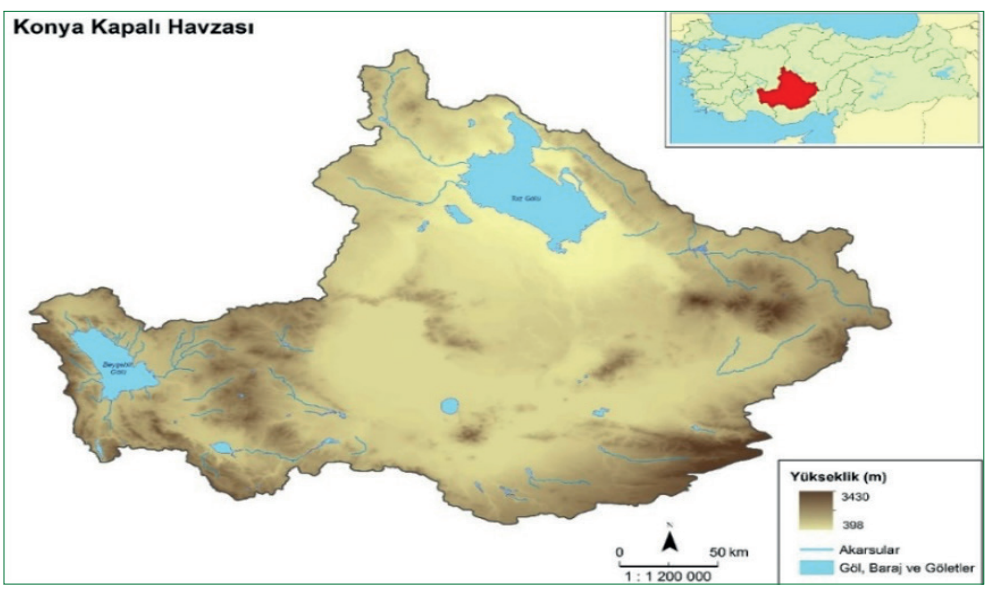
Marmara Havzası'nda tahmin edilen net YAS potansiyelinin 30 yıllık ortalamaları Şekil 8. Marmara Havzası'nda İklim Değişikliği Projeksiyonlarına göre Tahmin Edilen YAS Potansiyelinin 30 Yıllık Ortalamaları (OSİB, 2016). ile verilmektedir.

Tüm 30'ar yıllık dönemler boyunca referans dönemin üzerinde ya da civarında seyreden modeller MPI-ESM-MR ve CNRM-CM5.1 sonuçlarıdır. Gerek RCP4.5 gerekse RCP8.5 senaryosu sonuçları, her üç model dikkate alındığında en düşük değerlerin HadGEM2-ES ve bunu sırasıyla MPI-ESM-MR ve CNRM-CM5.1 modellerinin oluşturduğu görülmektedir. İstisnai durumlar MPI-ESM-MR modelinin 2015-2040 dönemi RCP8.5 sonuçları ve 2071-2097 dönemi RCP4.5 sonuçlarında gözlenmektedir. 30'ar yıllık ortalama YAS potansiyeli sonuçlarına göre her iki senaryoda da dönem referans değerine göre ortalama %20, bazı dönemlerde ise %57'ye varan oranlarda azalma görülmesi beklenmektedir.

## 4. Konya Kapalı Havzası

Konya Kapalı Havzası Türkiye'nin Orta Anadolu Bölgesinde 36°51' ve 39°29' kuzey enlemleri ile 31°36' ve 34°52' doğu boylamları arasında yer almaktadır. Yüzölçümü 4.980.534 hektar olup (SYGM, 2013), Türkiye'nin yaklaşık %7'sini teşkil etmektedir. Havzayı kuzeyde Sakarya ve Kızılırmak, doğuda Kızılırmak ve Seyhan, güneyde Doğu Akdeniz, batıda Antalya ve Akarçay havzaları çevrelemektedir. Havzanın yukarı kısmının kireç taşıyla ve volkanik dağlarla kaplı olması denize drenajını önlemekte; sularının ancak içerisindeki göllere, bataklıklara ya da yarı bataklıklara boşaltabilmesi sebebiyle kapalı havza niteliği taşımaktadır. Konya Kapalı Havzası'nın fiziki haritası Şekil 9. Konya Kapalı Havzası Fiziki Haritası (OSİB, 2016). ile verilmektedir.

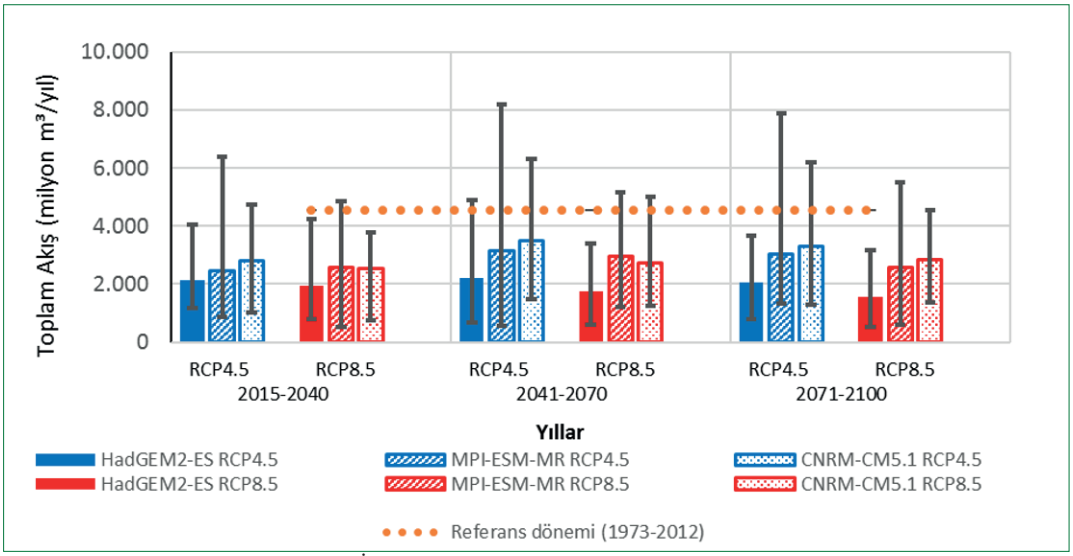
Toplam yağış alanı 56.554 $km^2$ olan Konya Kapalı Havzası'nın yıllık ortalama yağış yüksekliği 417 mm; yıllık ortalama akışı ise 192 $m^3/s$'dir. Yıllık ortalama verimi 3,39 $L/s/km^2$ olan havzadaki akışın yağışa oranı 0,26 iken, iştirak oranı %3,29'dur (TÜBİTAK MAM, 2010).




***Şekil 9.*** *Konya Kapalı Havzası Fiziki Haritası (OSİB, 2016).*

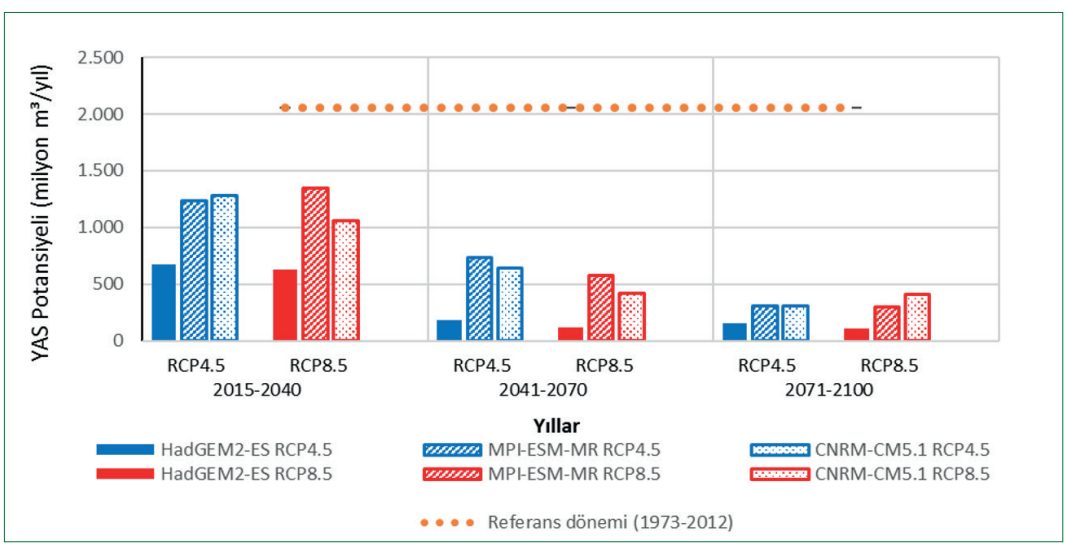
### 4.1. Toplam Akış

İklim Değişikliği Projeksiyonlarına göre Konya Kapalı Havzası'nda tahmin edilen 30 yıllık ortalama akışlar Şekil 10. Konya Kapalı Havzası İklim Değişikliği Projeksiyonlarına göre Tahmin Edilen Toplam Akış 30 Yıllık Ortalamaları (OSİB, 2016). ile verilmektedir.




***Şekil 10.*** *Konya Kapalı Havzası İklim Değişikliği Projeksiyonlarına göre Tahmin Edilen Toplam Akış 30 Yıllık Ortalamaları (OSİB, 2016).*

10'ar yıllık dönemlerde gözlenen durum, 30 yıllık ortalamalara da yansımakta ve benzer gidişat daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. 30'ar yıllık dönemlerde tüm model sonuçlarının referans dönem değerinin altında kaldığı görülmektedir. HadGEM2-ES modelinin her iki senaryosunun sonuçları tüm 30'ar yıllık dönemlerde en düşük sonuçları üretirken önemli salınımlar yapmamaktadır. HadGEM2-ES modelini sırasıyla her iki senaryo için MPI-ESM-MR ve CNRM-CM5.1 modelleri takip etmektedir.




***Şekil 11.*** *Konya Kapalı Havzası'nda İklim Değişikliği Projeksiyonlarına göre Tahmin Edilen YAS Potansiyelinin 30 Yıllık Ortalamaları (OSİB, 2016).*

MPI-ESM-MR ve CNRM-CM5.1 modellerinin her iki senaryosu için elde edilen sonuçlar birbirlerine yakın seyretmekte olup tüm dönemlerde istikrarlı bir durum sergilemektedir. 30 yıllık ortalamalara göre havzadaki toplam akış değerinin ortalama %40'lar düzeyinde, en fazla 2071-2100 döneminde %65 oranında düşmesi beklenmektedir. (Şekil 11)

### 4.2. Net YAS Potansiyeli

Konya Kapalı Havzası'nda tahmin edilen net YAS potansiyelinin 30 yıllık ortalamaları Şekil 11. Konya Kapalı Havzası'nda İklim Değişikliği Projeksiyonlarına göre Tahmin Edilen YAS Potansiyelinin 30 Yıllık Ortalamaları (OSİB, 2016). ile verilmektedir.

10'ar yıllık dönemlerde söz konusu durum 30 yıllık ortalamalara da yansımakta ve benzer gidişat daha net bir şekilde gözlenmektedir. Tüm dönemlerde modeller tarafından üretilen sonuçlar referans dönemin altında kalmakta olup, tüm değerler ilerleyen 30'ar yıllık dönemlerde önemli ölçüde azalmaktadır. Özellikle 2071-2100 döneminde havzanın YAS potansiyeli tüm sonuçlara göre en düşük seviyeye inmekte olup, referans dönemine göre %90~%95'e varan oranlarda azalma beklenmektedir (OSİB, 2016).

## 5. Su, Atıksu ve Yağmursuyu Yönetiminin, Kent Ölçeğinde İklim Değişikliği Eylem Planındaki Yeri ve Önemi: İstanbul Örneği

İklim Liderleri Grubu (CHO) üyesi olan İBB, Ekim 2019'da "Deadline 2020 Taahhüdü"nü imzalamıştır. Bu kapsamda İBB İstanbul'un 2050 yılına kadar karbon nötr ve iklim değişimine dirençli bir şehir olma hedefini kabul etmiştir. Bu kapsamda İstanbul İklim Değişikliği Eylem Planı (İİDEP) hazırlanmıştır.

IPCC Küresel Isınma Özel Raporu'nda belirtildiği üzere; 2030 yılına kadar küresel ortalama sıcaklık artışının 1,5°C ile sınırlandırılması ve söz konusu sınırı aşmamak için sera gazı salımlarının 2030 yılında 2010 yılı eşik değerlerine oranla %45 azaltılması ve 2050 yılında net sıfır emisyona ulaşılması gerekmektedir.

İklim değişikliğinin olası etkilerine İstanbul özelinde bakıldığında, süresi ve şiddeti giderek artan sıcaklık dalgaları, kuraklık ve değişen yağış rejimleri öne çıkmaktadır. Kent sınırları içinde karbon yutak alanlarının korunması ve sürdürülebilirliğinin sağlanması için, yeşil altyapının güçlendirilmesi ve ormanlık alanların artırılmasına öncelik verilmesi gerekmektedir. Ayrıca atık yönetimi, ulaşım ve yenilenebilir enerji yatırımları, döngüsel ekonomi, yeraltı sularının korunması, yağmur suyu hasadı ve atıksu geri kazanımının geliştirilmesi gibi konular sürdürülebilir bir çevresel tasarım için büyük önem arz etmektedir.

İstanbul'da, iklim kriziyle mücadelede emisyon azaltımı ve uyum stratejileri için uygun hedeflerin tespiti ile iklim değişikliğinden en çok etkilenecek gruplar bazında sosyal politikaların ve iklim adaletinin göz önünde bulundurulması büyük önem taşımaktadır.

İstanbul İklim Değişikliği Eylem Planı'nda, İBB'nin tüm plan ve çalışmalarının, Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları'na hizmet edecek şekilde gerçekleştirilmekte olduğu ifade edilmektedir. 2050'de karbon nötr bir şehir olmak için ilgili belgelerde, Şekil 12. Eylem Planları Arasındaki İlişki (İBB, 2021).'de de belirtildiği üzere, İİDEP ile ilişkili en önemli planlardan biri İSKİ Master Planı'dır.




***Şekil 12.*** *Eylem Planları Arasındaki İlişki (İBB, 2021).*

İİDEP'te İSKİ'nin Su ve Atıksu Master Planı kapsamındaki 4 öncelikli eylem,

- Su kullanımının azaltılması
- Su kaybının azaltılması
- Atıksuların yeniden kullanımı
- Sürdürülebilir kentsel drenaj (yağmur suyu) çözümleri (yağmur bahçeleri, geçirimli yüzey kaplamaları, depolama v.b.)

başlıkları altında ele alınmaktadır.

Su ve atıksu yönetimi alt başlığı altında, İSKİ'nin gerçekleştireceği çevre dostu yatırım programı ile atıksu arıtma tesisi kapasitesinin ~1.000.000 $m^3$/gün (~%17'lik artış) artırılarak Marmara, Boğaz ve Karadeniz'in kirlenmesinin önleneceği; ayrıca atıksu arıtma tesisi çamurlarından yenilenebilir enerji üreteceği ifade edilmektedir.

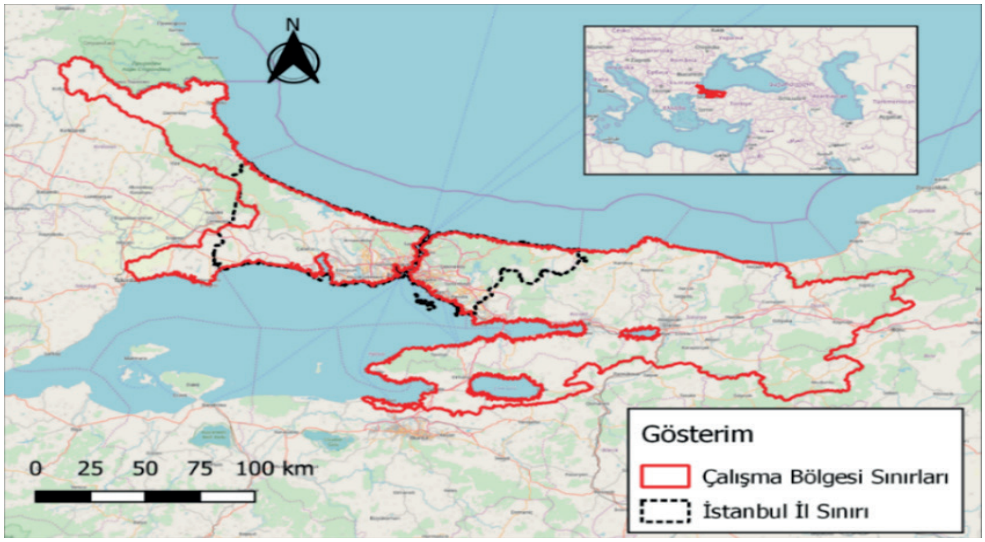
## 6. İstanbul ve Yakın Civarındaki Su Kaynaklarına Özgü Yüksek Çözünürlüklü İklim Modellemesi ve Hidrolojik Modelleme Çalışması

Daha önce açıklandığı üzere, IPPC'nin yayınladığı 5. Değerlendirme Raporu'nda Temsili Konsantrasyon Yolları (Representative Concentration Pathways (RCP)) olarak adlandırılan terim gelecekte ortaya çıkabilecek farklı seviyelerdeki sera gazlarını ve diğer ışınımsal zorlamaları tanımlamaktadır. 2100 yılı için (2,6, 4,5, 6,0 ve 8,5 watt/$m^2$) geniş bir zorlama aralığını kapsayan dört senaryoda sosyoekonomik etkiler gerekli ölçüde dikkate alınmamaktadır.

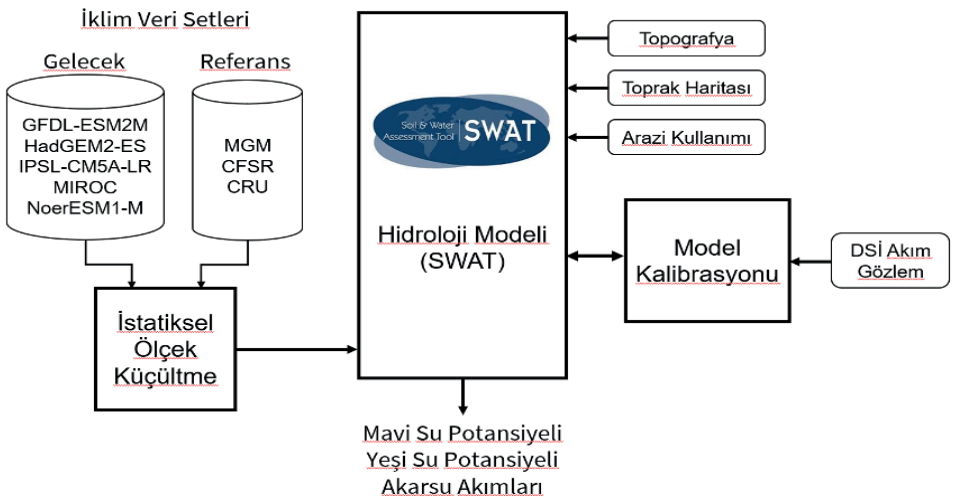
Sosyoekonomik faktörlerin gelecek yüzyılda nasıl değişebileceğinin modellemesi üzerinde çalışan başka bir grup; nüfus, ekonomik büyüme, eğitim, kentleşme ve teknolojik gelişme hızı gibi faktörleri içeren senaryolar geliştirmişlerdir. Paylaşılan Sosyoekonomik Yollar (Shared Socioeconomic Pathways (SSP)) adı verilen söz konusu senaryolarda, iklim politikasının yokluğunda dünyanın dönüşebileceği beş farklı durum incelenmekte ve RCP'lerin azaltma hedefleri SSP'ler ile birleştirildiğinde iklim değişikliği ile ilgili farklı düzeylerin nasıl elde edilebileceğine bakılmaktadır. RCP'ler, IPCC 5. Değerlendirme Raporu'nda kullanılmak üzere tanımlanmış olsa da daha karmaşık SSP'lerin geliştirilmesi çok daha uzun ve daha kapsamlı bir süreç olmuştur (URL-1, 2018). SSP'ler IPCC'nin 6. Değerlendirme Raporu'nda RCP'ler yerine kullanılmak üzere teklif edilmiştir (IPPC, 2021).

Cüceloğlu (2019) tarafından doktora tezi dolayısıyla yürütülen bir çalışmada; içme-kullanma suyunun çoğunlukla yüzeysel kaynaklardan sağlandığı İstanbul'da, iklim değişiminin yüzeysel su potansiyeline etkileri ve ileride karşılaşılabilecek krizlerde risklerin azaltılması konusu incelenmiştir. Bu kapsamda, İstanbul'un yüzeysel su kaynaklarının hidrolojik modellemesi yapılarak yüzeysel su potansiyeli belirlenmiş, iklim değişiminin su kaynaklarına olası etkileri araştırılmış; su temin sistemi ile su arz ve talepleri iklim değişimi senaryolarına bağlı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında incelenen su kaynaklarının içinde yer aldığı bölge, İstanbul il sınırı ile birlikte Şekil 13. Çalışma Bölgesi Sınırları ve İstanbul İl Sınırı (Cüceloğlu, 2019).'te gösterilmektedir.

Anılan tezde, iklim değişiminin su kaynaklarına etkisinin araştırılması kapsamında IPPC'nin 5. Raporu'nda belirtilen 2 farklı senaryo (RCP8.5) ve RCP4.5) altında 5 farklı iklim modeli (GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC ve NoerESM1-M) çıktıları istatistiksel ölçek küçültme yöntemi kullanılarak çalışma bölgesine uyarlanmıştır (Şekil 14. Çalışma Metodolojisi (Cüceloğlu, 2019).).




***Şekil 13.*** *Çalışma Bölgesi Sınırları ve İstanbul İl Sınırı (Cüceloğlu, 2019).*




***Şekil 14.*** *Çalışma Metodolojisi (Cüceloğlu, 2019).*

Günlük içme-kullanma su ihtiyacı 3 milyon $m^3$ olan ve bu ihtiyacın büyük ölçüde yüzeysel su kaynaklarından temin edilen İstanbul'da, Soil and Water Assessment Tool (SWAT) modeli ile içme-kullanma suyu temin edilen havzalara ilişkin su bütçesi hesaplanmış; model, kalibrasyon ve belirsizlik analizi için ise SWAT- CUP programının içinde bulunan SUFI2 algoritması kullanılmıştır. Kalibrasyon için DSİ tarafından işletilen ve çalışma bölgesinde bulunan 25 farklı akım gözlem istasyonuna ait akım rasatlarından yararlanılmıştır. Ayrıca, yağış ve sıcaklık verileri için küresel iklim modeli (GCM) çıktıları kullanılmıştır. Referans dönemi olarak seçilen 1980-2013 verileri kullanılarak SWAT modeli çalıştırılmış, iklim değişimi projeksiyonları ise

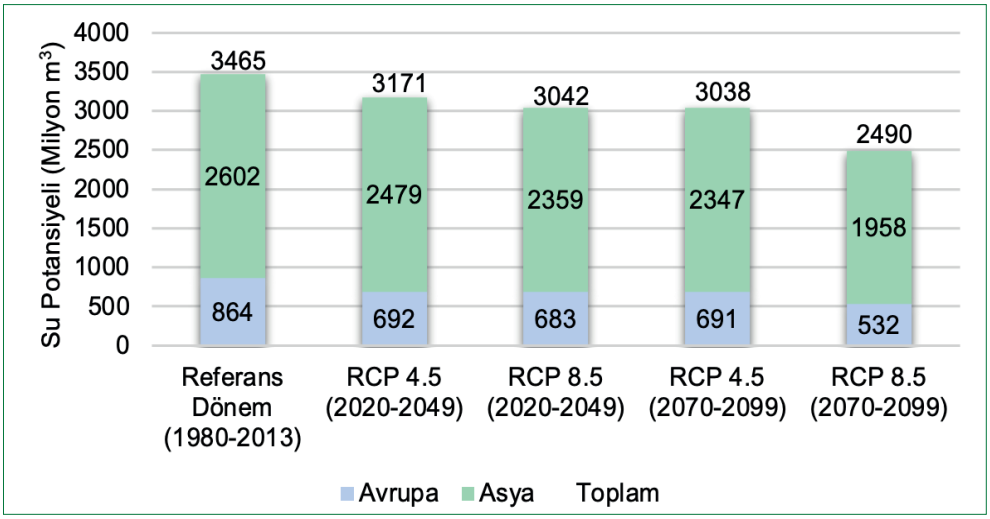
2020-2099 dönemi için yapılmıştır. Referans dönem ortalama yıllık akım (İstanbul'un tüm su kaynaklarına ulaşan toplam) değerinin 108 $m^3/s$ olduğu model sonuçları Tablo 1. RCP4.5 ve RCP8.5 Senaryoları için Baraj Göllerine Ulaşan Toplam Akım Değerleri (Cüceloğlu, 2019)'de özetlenmiştir. Modelleme çalışmalarında göre söz konusu değer, 2020-2099 döneminde, RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryo simülasyonları için sırası ile 90 $m^3/s$ ve 84 $m^3/s$ olarak tahmin edilmektedir.

***Tablo 1.*** *RCP4.5 ve RCP8.5 Senaryoları için Baraj Göllerine Ulaşan Toplam Akım Değerleri (Cüceloğlu, 2019)*

| Senaryo | 1980-2013 (Referans) Dönemi | 2020-2049 Dönemi Ortalama Debi (m3/s) | 2070-2099 Dönemi Ortalama Debi (m3/s) | 2020-2049 Dönemi Değişim (%) | 2070-2099 Dönemi Değişim (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| **RCP 4.5** | 108 | 95 | 88 | 12 | 19 |
| **RCP 8.5** | 108 | 92 | 76 | 15 | 30 |

Çalışma sonuçlarına göre, İstanbul'un toplam su potansiyelinin yakın (2020-2049) dönemde RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryolarına göre sırası ile %12 ve %15 oranında, uzak (2070-2099) dönemde ise RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryolarına göre sırası ile %19 ve %30 oranında azalması beklenmektedir.

Şekil 15. İklim modellerinin RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryolarının göre toplam su potansiyelindeki (milyon m3) değişimlerin Asya ve Avrupa bölgesindeki dağılımı (Cüceloğlu, 2019).'te İklim modellerinin RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları için toplam su potansiyelindeki (milyon $m^3$) değişimlerin Asya ve Avrupa bölgesindeki dağılımı verilmiştir.




***Şekil 15.*** *İklim modellerinin RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryolarının göre toplam su potansiyelindeki (milyon $m^3$) değişimlerin Asya ve Avrupa bölgesindeki dağılımı (Cüceloğlu, 2019).*

Bu şekle göre, Avrupa bölgesinde yer alan su kaynaklarının potansiyelindeki azalma Asya bölgesinden daha fazladır. Bu duruma ek olarak, şehrin nüfusunun büyük çoğunluğunun Avrupa yakasında ikamet etmesi nedeni ile İstanbul su temini sisteminin gelecekte karşılaşabileceği uzun dönem kuraklıkların yol açacağı su eksikliğinden Avrupa bölgesinin daha fazla etkilenmesi beklenmektedir (Cüceloğlu, 2019).

Hidrolojik model sonuçlarına göre Melen Havzası ile birlikte İstanbul'un 1980-2013 referans dönemi için mavi su (akarsu/nehir akışları) potansiyeli 3,5 milyar $m^3$/yıl, yeşil su (zemin nemi/suyu) akışı 2,9 milyar $m^3$/yıl ve yeşil su deposu 0,9 milyar $m^3$/yıl olarak belirlenmiştir. Melen Havzası 1,05 milyar $m^3$/yıl'lık su potansiyeli ile şehrin su potansiyelinin %45'ini oluşturmaktadır ve İstanbul için en önemli su kaynağı konumundadır.

Su bütçesi simülasyonlarına göre, Melen Barajı'nın devreye alınmaması ve yalnızca regülatörden su transferi yapılması söz konusu olduğunda (Melen Projesi 2. Aşama) İstanbul'un içme-kullanma suyu ihtiyacının sağlanmasında 2045'lerin başından itibaren sorun yaşanabilecektir. Melen Barajı'nın tamamlanması ile birlikte toplam su depolama hacmi büyük ölçüde artacağı için, geliştirilen su temin sisteminin 2070 yılına kadar İstanbul'un su ihtiyacını karşılayabilecek potansiyele sahip olacağı öngörülmektedir (Cüceloğlu, 2019).

## 7. Suki Master Planlarında İklim Değişimine Dirençli Su Yönetimi Yaklaşımı

Su ve Kanalizasyon İdareleri'nin üstlendikleri görevleri etkin ve ekonomik bir şekilde yapabilmeleri için stratejik hedef ve yükümlülükleri doğrultusunda su, atıksu ve yağmursuyu işleri ile ilgili master plan hazırlamaları ve hazırlatmaları oldukça önemlidir. İyi hazırlanmış bir master plan, gelecek 30~40 yıl için idareye iyi bir yol haritası oluşturacaktır. Bir master plan idareye aşağıdaki konularda rehberlik edecektir:

- Mevcut tesislerin ıslahı
- Gelecekte ihtiyaç duyulacak tesislerin tipleri, boyutları, kapasiteleri
- İklim ve çevresel etkiler
- Yıllık yatırım programı
- Tarifeler ve tarife yapısı
- Kurumsal yapı, gerekli kurumsal kapasite
- İşletme modeli ve varlık yönetimi

Master planların su ve atıksu yönetimindeki önemi sebebiyle, bazı ülkelerde master plan hazırlanması ya zorunlu tutulmakta veya ulusal seviyede hazırlanmış olan el kitapları ile su ve atıksu idarelerine yardımcı olunmaktadır (Sarıkaya, 2017).

Hazırlanacak master planın coğrafi kapsamı, su ve kanalizasyon idarelerinin hizmet alanları ile sınırlı olacaktır. Türkiye'de su ve kanalizasyon idarelerinin sorumluluk alanları, il sınırları olarak belirlendiği için coğrafi kapsamda il sınırları olacaktır. İstanbul'da olduğu gibi su kaynakları il sınırları dışında olursa, bu kaynakların korunması ve geliştirilmesi ile ilgili faaliyetler de master plan kapsamı içinde ele alınmalıdır.

SUKİ Master Planları için en iyi örneklerden biri, İstanbul Master Planı Konsorsiyumu (IMC) tarafından İSKİ için 1994-1999 yılları arasında hazırlanan İSKİ Su, Atıksu ve Yağmursuyu Yönetimi Master Planı'dır (IMC, 1999). İSKİ Master Planı'nda 2000-2020 dönemindeki Su Temini, Atıksu ve Yağmursuyu yatırımları ile mevcut altyapının sürdürülebilirliği için öngörülen toplam yatırım miktarı 9.661 milyar $'dır. Söz konusu Su ve Atıksu yatırımları (~8,5 milyar $) ile işletme ve bakım için gerekli harcamaların, ~3,3 milyar $ dış kredi kullanılarak, ~1,1 $/$m^3$'lük bir su atıksu tarifesi ile İSKİ'ce finanse edilebileceği ortaya konmuştur. Yağmursuyu ve dere ıslah yatırımları tutarı olan 1,21 milyar $'ın ise, İSKİ görev alanı dışındaki bir hizmet olduğu için İBB tarafından ayrıca finanse edilmesi önerilmiştir. İSKİ Master Planı'nda takvime bağlanan Su, Atıksu ve Yağmursuyu yatırımları, sınırlı revizyonlarla, öngörülen takvime uygun olarak %80'in üzerinde bir oranda gerçekleştirilmiştir.

İSKİ'nin 1999 yılında yayınlanan söz konusu Master Planı, başka bir uluslararası konsorsyum (Royal Haskoning DHV-Yüksel Proje-Dolsar Mühendislik) tarafından 2018-2022 döneminde "Suya Duyarlı Kent" önceliği ile güncellenmektedir. İstanbul'un 2023-2053 dönemi ihtiyaçlarını planlamak üzere yürütülen bu çalışmada, İstanbul'a su sağlayan yüzeysel su kaynaklarındaki toplam akışlarda, İklim değişimi kaynaklı olarak Cüceloğlu (2019) tarafından önerildiği üzere, ~%15 oranındaki azalma olabileceği esası ile planlama yapılmaktadır (İSKİ, 2021).

## 8. Su Temini (Arzı) Güvenliği

Daha önceki bölümlerde özetle değinilen, OSİB "İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkisi Projesi" sonuçlarına göre, Türkiye'nin Kuzey ve Kuzeydoğu Kesimi (Karadeniz ve Kuzeydoğu Anadolu) hariç, diğer bölgelerde iklim değişimi etkileri dolayısıyla 2015-2100 döneminde, yüzeysel su potansiyelinde (nehir akışları/mavi su) %15~40 arasında azalmalar beklenmektedir. Özellikle büyükşehirlerimize su sağlayan yüzeysel su kaynaklarında ortaya çıkması kaçınılmaz olan muhtemel su açığının giderilebilmesi/karşılanabilmesi için aşağıdaki seçenekler söz konusu olabilir:

- **Su Arzının Artırılması**. Varsa ilave yeni su kaynaklarının planlanıp devreye alınması
- **Su Kayıp ve Kaçaklarının Azaltılması.** Türkiye'de ortalama %35~40 aralığında seyreden su şebekesi kayıpları; basınç denetimi, mikro bölgeleme, yenileme vb. uygulamalar ile dünya ölçeğinde makul limit olarak kabul edilen %10~15 aralığına

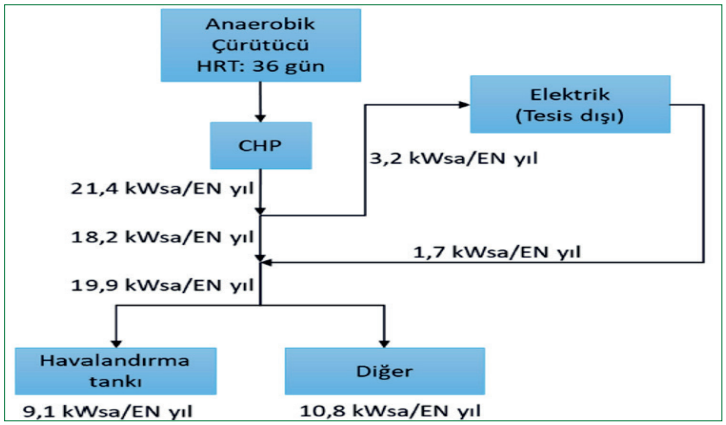
çekilmek suretiyle mevcut su temin sistemi kapasitesinin ~%15-20'sine karşı gelen miktarda bir kaynak sağlanabilir. Örneğin İstanbul'da ~%25 düzeyindeki mevcut şebeke kayıp kaçak oranı %15'e çekilerek günlük olarak 3.000.000 x 0,10 = 300.000 $m^3$ (yılda 110 milyon $m^3$) ilave su kaynağı oluşturabilir. En ucuz kaynak, eldeki su daha etkin kullanılarak elde edilebilir.

- **Daha etkin bir talep yönetimi.** Bu kapsamda başlıca; evlerde tasarruflu armatür, sifon haznesi ve ev aletleri kullanımı, daha hassas sayaç kullanımı, tuvaletlerde gri su veya arıtılmış atıksu (mor şebeke) kullanımının teşviki, kentsel yeşil alan sulaması ve araç yıkamada arıtılmış atıksu kullanımı ile yeni geliştirilen/dönüştürülen bölgelerde ikili şebeke uygulamaları gibi seçenekler düşünülebilir. Bu sayede su talebinde %40'lara varan oranlarda azaltım sağlanabilmektedir.
- **Kademeli su tarifesi uygulaması.** Medyan harcanabilir hane halkı gelirinin ~%2-2,5'ini aşmayan, tüketilen su miktarına göre artan kademeli ve sürdürülebilir bir su tarifesi uygulayarak kişi başına su tüketimi (özellikle orta ve düşük gelirli ailelerde) makul seviyelerde tutulabilir (Öztürk vd., 2020b). Örneğin, kademeli tarifesi uygulanan İstanbul'da yıllık ortalama birim su tüketimi ~133 L/kişi.gün (4 kişilik bir hane için ~194 $m^3$/yıl) seviyesinde tutulabilmektedir. Bu değer Avrupa Birliği (AB) büyükşehirlerindeki ortalamalar civarındadır.

*Yukarıda belirtilen talep yönetimi ağırlıklı su tasarrufu tedbirleri ile birim su tüketiminin, temizlik konforuna zarar vermeksizin, 60~80 L/kişi.gün seviyelerine kadar düşürülebileceği beklenmektedir.*

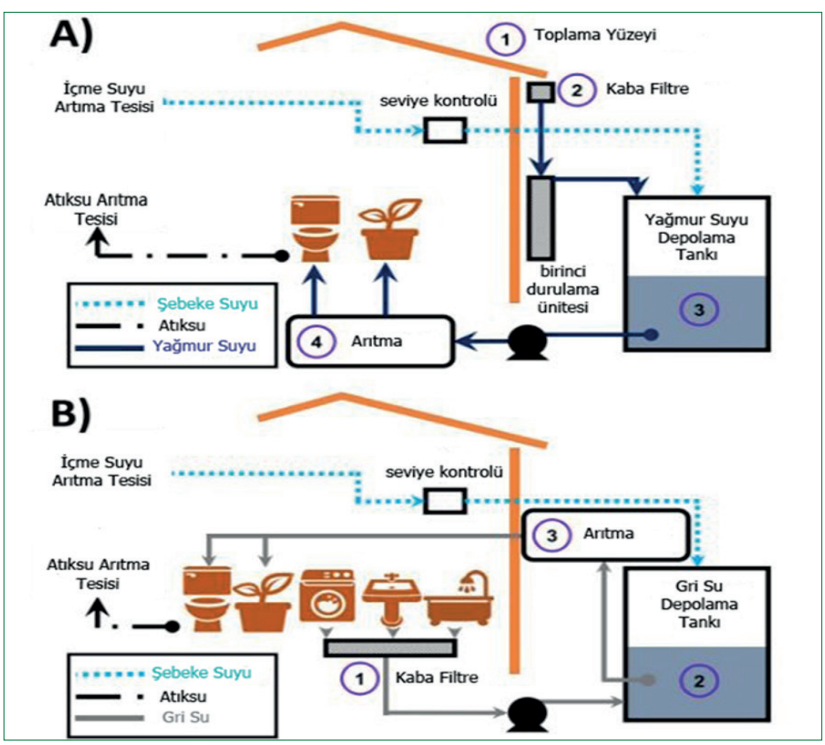
## 9. Bütünleşik Atıksu Yönetimi

Nüfus artışı, hızlı kentleşme ve kalabalık şehir yaşamı gibi etkenler dolayısıyla atıksu arıtma tesisleri (AAT)'ne olan ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Tesis kapasiteleri ve sayılarının artışına bağlı olarak işletme için gerekli enerji ihtiyacı da artış göstermektedir. Bu kapsamda işletimde olan AAT'lerde enerji tüketiminin azaltılması ile madde ve su geri kazanımının sağlanması günümüzde önem arz etmektedir. Söz konusu enerji ve madde geri kazanımı, geleneksel aktif çamur (AÇ) proseslerinin uygulandığı AAT'lerde yüksek seviyelerde sağlanamadığından, yenilikçi arıtma proseslerinin uygulanması konusu öne çıkmaktadır. Tasarlanan yenilikçi prosesler ile AAT'lerin enerji nötr hatta enerji pozitif hale getirilmesi sayesinde, atıksudaki faydalı maddelerin geri kazanımı mümkün hale gelmektedir. AAT'lerde sağlanan proses optimizasyonu ile enerji tüketiminin düşürülmesi ve arıtma çamurlarının enerji muhtevasının artırılması mümkündür (Şekil 16. Strass AAT (EN= 90.000~200.000 kişi)enerji dengesi (Nowak vd., 2011)). Arıtma sonrası açığa çıkan çamur farklı işlemlerden geçirilerek toprak şartlandırıcısı (kompost) veya yardımcı yakıt olarak kullanılabilir. çürütücü yan akımlarından çeşitli formlarda azot ve fosfor geri kazanımı sağlanabilmektedir. AAT'lerde ileri arıtma teknolojilerinin uygulanması neticesinde sulama suyu, sanayide kullanım suyu, tuvalet sifon suyu vb. gibi farklı alanlarda kullanılmak üzere su geri kazanımı mümkündür. AAT'lerden enerji, madde ve su geri kazanımının maksimum şekilde sağlanmasıyla AAT'ler atıksu rafinerilerine dönüştürülebilirler (Erşahin vd., 2022).




***Şekil 16.*** *Strass AAT (EN= 90.000~200.000 kişi)enerji dengesi (Nowak vd., 2011)*

Bütünleşik atıksu yönetimini destekleyen diğer bir seçenek de yağmursuyu hasadı ve gri su geri kazanımı uygulamasıdır. Şekil 17. Binalarda, (A) yağmursuyu toplama sistemi ve (B) gri su tekrar kullanım sistemi örneği (Leong, vd., 2019). ile şematize edilen bu yöntem sayesinde, evlerdeki banyo/duş, lavabo (mutfak hariç) ve çamaşır suları (gri sular) ayrı bir tesisatta toplanıp arıtıldıktan sonra WC sifon suyu olarak yeniden kullanılabilmektedir. Bu sistemin yağmur suyu hasadı ile de entegre edilmesi sonucu, su talebinde %50'ye varan tasarruf elde edilebilmektedir.




***Şekil 17.*** *Binalarda, (A) yağmursuyu toplama sistemi ve (B) gri su tekrar kullanım*

## 10. Yağmursuyu Drenajı ve Taşkın Yönetimi

Türkiye'de Büyükşehir Belediye sınırları içindeki yağmursuyu şebekelerinin yapımı ilçe belediyeleri sorumluluğundadır. Yağmursuyu şebeke mansapları ile dere ıslahları ise Büyükşehir Belediyeleri tarafından planlanıp inşa edilmektedir. Büyükşehir belediyeleri kendi sorumluluk alanındaki yağmursuyu projelerinin yapımını, gerekli bütçeyi ayrıca aktarmak suretiyle, özel protokolle SUKİ'lere vermektedir.

Yağmursuyu şebeke ve mansapları (dereler) altyapısı mülkiyeti, ilçe ve Büyükşehir Belediyelerine ait olduğundan yağmursuyu yönetimi SUKİ'lerin görev alanı dışında kalmakta ve Su-Atıksu tarifelerinde bu konuda bir hizmet bedeli karşılığı yer almamaktadır. Giderek büyüyen bir sorunn haline gelen bu konuyu çözmek üzere SUKİ temel kanunu olan İSKİ Kanunu'nda değişiklik yapılarak yağmursuyu yönetiminin de bütünüyle SUKİ'lere verilmesine ilişkin olarak Türkiye Belediyeler Birliği koordinasyonunda yürütülen çalışmanın yakın vadede sonuçlanması beklenmektedir. Bu kapsamda ilçe ve büyükşehir belediyelerine ait mevcut yağmursuyu şebeke ve dere ıslah altyapısının da, bedelsiz olarak, SUKİ'lere devrinin sağlanarak, mevcut su+ atıksu tarife bedellerinin, tam maliyet gerikazanımı esasıyla, su+atıksu+yağmursuyu hizmetlerini kapsamak üzere yeniden belirlenmesi gerekmektedir.

### 10.1. Geleneksel Yağmursuyu Drenajı (Gri Altyapı)

Dünya genelinde Kentsel Yağmursuyu Drenajı'nda uygulanan klasik (geleneksel) yöntem, meskûn mahallerin yer aldığı coğrafi konum ve meteorolojik şartlar dikkate alınarak, 2 veya 3 yılda bir tekerrürlü yağışlar için, kapalı (boru ve/veya açık kanallı) yağmursuyu şebekesinin tasarlanıp yapılmasıdır. Bu şebekeye mansap teşkil eden akarsu ve derelerde ise, genelde 100 yıllık taşkınla ($Q_{100}$) gelecek debinin taşmadan sert kesit (yatak) içerisinde tutulması; bunun üzerindeki taşkınların ($Q_{200}$ veya $Q_{500}$) ise derelerin her iki tarafındaki yeşil koridorlarda, bina su basma kotlarının altında kalacak şekilde kontrollü olarak taşımasına müsaade edilmesi ve bu koridora komşu (taşkın riski altında) yerlerdeki bodrum kat yapımına izin verilmemesi veya (varsa) mevcut bodrum katların konut ve işyeri olarak kullanımlarının yasaklanması yoluna gidilmektedir.

Yukarıda özetle değinilen bu tür geleneksel kentsel yağmursuyu yönetimi, Türkiye'deki gibi yoğun çarpık yapılaşma bulunan ve çoğu dere yataklarında bina ve işyerlerinin yer aldığı durumlarda çok ciddi sorunlara yol açmaktadır. İklim değişimi dolayısıyla aşırı doğa olaylarının sıklık ve şiddetlerinin giderek artma eğiliminin, mevcut sorunları daha da büyütmesi beklenmektedir. Mevcut durum itibarı ile ülke genelinde, yağmursuyu şebekeleri ile toplanan drenaj sularını tahliye edecek doğal dere yatakları üzerinde yer alan ve daha önce imar/iskân izni verilmiş yapıların tahliyesi, çoğu kez belediyelerin kendi imkanları ile altından kalkamayacakları kamulaştırma bedellerinin ödenmesini gerektirmektedir. Bu kronik sorunu çözmek üzere, 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkındaki Kanunun kapsamı, depremle birlikte taşkın riski altındaki alanları da (dere yatakları) içermek üzere genişletilerek; bu tür

alanlardaki yapılar belli bir süreçte kentsel dönüşüm kapsamına alınmak suretiyle, meskûn bölge içindeki dere yatakları boyunca yeşil koridorların oluşturulmaları sağlanabilir. Bu yolla çarpık yapılardan arındırılan kent içi derelerin ıslahı DSİ ve/veya ilgili SUKİ'lerce, peyzajlı dere konseptine uygun olarak gerçekleştirilebilir.

### 10.2. Sürdürülebilir veya Yeşil Drenaj Sistemleri

***Yeşil Altyapı Sistemleri***

Stratejik şekilde planlanmış ve tasarlanmış doğal ve yarı doğal unsurların entegre olarak bir araya getirilmesi ile şehirlerin gri altyapıya olan yönelimini azaltıp büyük ölçüde sosyal, ekonomik ve ekosistem hizmetlerinin bir araya getirildiği sistemler "yeşil altyapı sistemleri" olarak adlandırılır (Eşbah Tuncay, 2021). İnsan yoğunluğunun yüksek olduğu konut ve ticaret alanlarındaki yeşil altyapı sistemleri incelendiğinde, karbon ve su ayakizi düşük şehir ekosistemi ön plana çıkmaktadır. Bu kapsamda günümüzde Çevre Dostu Bina tasarımı artmış ve konuyla ilgili belirli standartlar ön plana çıkmaya başlamıştır. Bunlardan en öncelikli olanı su tüketimini azaltarak suyu etkin ve verimli kullanmaktır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın 2021 yılında yayınladığı "Binalar ile Yerleşmeler için Yeşil Sertifika Uygulama Tebliği'ne göre Su ve Atıksu Yönetimi bölümü altında 6 kriter bulunmaktadır (ÇŞB, 2021): Bunlar: (**1**) Suyun verimli ve etkin kullanımı için uygun armatür kullanımı, (**2**) Su dağıtımında kayıp ve kaçakların önlenmesi için ihtiyaç duyulan tedbirlerin alınması, (**3**) Sayaçlarla su kullanımının takip edilmesi ve kayıt altına alınması, (**4**) Su kalitesinin kontrolü, (**5**) Yağmur suyu rasadı, arıtması ve kullanılması, (**6**) Gri suyun geri kullanımıdır.

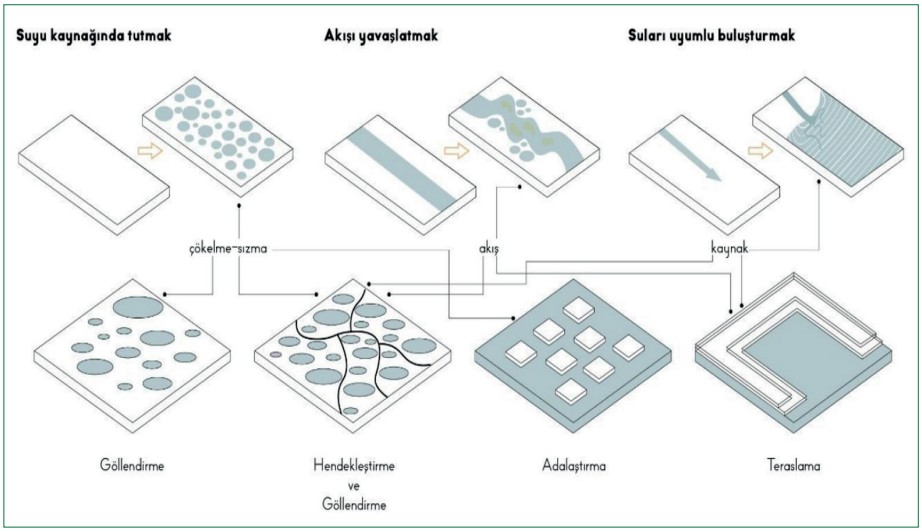
İklime dirençli kent konseptinin gelişim sürecinde, yeni binaların bu kriterlere uygun olarak yapımının yaygınlaştırılması beklenmektedir.

***Sünger Şehirler***

Su odaklı ekolojik altyapı ile oluşturulmuş şehirler sünger şehirler olarak adlandırılır. Sünger şehir konseptinde su şehre entegre edilerek şehir tarafından absorbe edilir. Kentsel su havzaları korunur, su kalitesi iyileştirilir, seller ve taşkınlar suyun şehre entegre edilmesiyle önlenir, su kıtlığı ve su kirliliğinin önüne geçilerek habitatlar iyileştirilir ve su şehir içine estetik bir öge olarak dahil olur.

Suyun şehirden tahliyesini baz alan gri altyapıda (yağmursuyu şebekesi) su bir atık olarak ele alınırken yeşil altyapıda su kaynak vazifesi görmektedir. Nehir, sulak alan, orman, makro ve mikro ölçekteki kentsel boşlukları; su ve biyoçeşitlilik gözetilerek sosyal manada kapsayıcı mekanlara dönüştürmek, yeşil altyapı sistemlerinin ana amacıdır (Eşbah Tuncay, 2022).

Sünger şehir konseptindeki 3 bileşen suyu kaynağında tutmak, akışı yavaşlatmak ve suları doğayla uyumlu biçimde buluşturmaktır. Bu konseptin ayrıntıları Şekil 18. Sünger şehirler teknikleri (teraslama, göllendirme, seddeleme ve göllendirme, adalaştırma)'de verilmiştir.




***Şekil 18.*** *Sünger şehirler teknikleri (teraslama, göllendirme, seddeleme ve göllendirme, adalaştırma) (Eşbah Tuncay, 2021).*

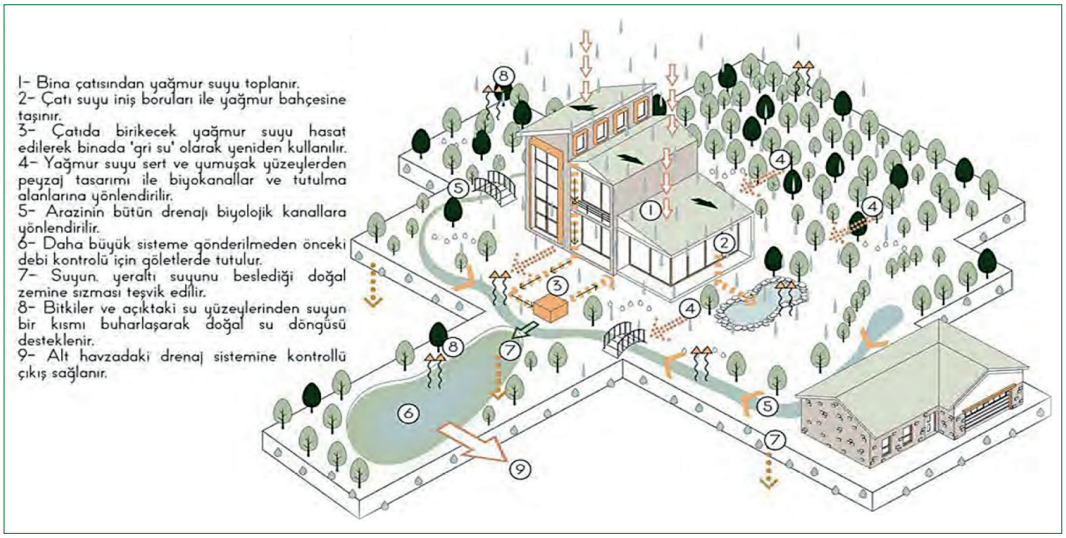
Sünger şehir tasarımında dikkat edilen hususlardan bir diğeri de projelerdeki kazı dolgu oranlarını dengeleyerek kullanılan malzeme miktarının azaltılması ve ekolojik ayakizinin düşürülmesidir (Shen, 2010). Sünger şehirlerde sürdürülebilir drenajı sağlamak için gri çözümler ile yeşil çözümlerin entegrasyonu sağlanabilir.

Bu tür bir entegrasyonda dikkat edilmesi gereken hususlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir (Eşbah Tuncay, 2022):

- Planlama süreçlerine erken aşamada dahil olmak
- Yüzey suyunu bir kaynak olarak görmek
- Yağışı düştüğü yerde kontrol etmek
- Suyu yüzeyde yönetmek
- Kirliliği yönetmek
- Yüzeysel akışı azaltmak

### 10.3. Sürdürülebilir Kentsel Drenaj

Sürdürülebilir kentsel drenaj, yüzeysel akıştaki suyun yönetimi için suyun debisi, su kalitesi, biyoçeşitliliği ve estetik açıdan uygun bir yönetim sistemi kurmayı hedefleyen sistem bütünüdür. Sürdürülebilir kentsel drenaj sisteminde yağmursuyu bir sorun olarak değil bir kaynak olarak ele alınır ve gerekli proseslerden geçirilerek kullanımı sağlanır. Bu durumda, arıtma tesisine gönderilen atıksu miktarındaki azalma, tesis kapasitesini düşürerek tesisin enerji ihtiyacını azaltır ve sürdürülebilir kentsel drenaj sistemleri; uygun yöntemlerle toplanan yağmursuyunun verimli şekilde kullanılmasıyla kent içinde estetik ve yeşil altyapı sistemlerinin oluşmasına katkıda bulunur. Yağmursuyunun uygun yöntemlerle toplanılıp yeşil altyapı sistemleriyle drenajı Şekil 19. Sürdürülebilir Kentsel Drenaj Yaklaşımı (Eşbah Tuncay, 2021)'da gösterilmektedir.




***Şekil 19.*** *Sürdürülebilir Kentsel Drenaj Yaklaşımı (Eşbah Tuncay, 2021)*

## 11. Değerlendirme ve Öneriler

Büyük kısmı Akdeniz iklim kuşağında yer alan Türkiye, küresel İklim Değişimi'nin olumsuz etkilerinin yoğun biçimde hissedileceği ülkelerden biridir. İklim değişiminin etkilerini dengeleyici ve azaltan uyum tedbirlerinin, dünya ile eş zamanlı olarak uygulamaya konarak 2053 yılı itibarı ile ülke Net Karbon Ayakizi'nin sıfırlanabilmesi için Su Sektörü ve SUKİ'ler ile ilgili aşağıdaki yasal, idari ve teknik yapılanma tedbirlerinin alınması gerektiği düşünülmektedir:

**Cumhurbaşkanlığı hükümeti düzeyinde;** Ulusal Su Kanunu'nun (İklim Değişimine Dirençlilik ile ilgili hususları da içermek üzere) acilen yasalaştırılması; ülke bütününde iklim değişimine uyum ve sera gazı azaltımı ile dirençliliğin artırılması; kentsel ve kırsal su-atıksu-yağmursuyu altyapısının Birleşmiş Milletler Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (BM SKA)16 hedefleri ile uyumlu hale getirilmesi;

**Bakanlıklar (ÇŞİ, Tarım Orman, Sağlık, İçişleri, Sanayi ve Teknoloji, Turizm) düzeyinde;** ulusal politikalarla uyumlu üst ölçekli planlar geliştirilmesi; büyükşehirler dışındaki illerde Bütün-şehir yapılanmasına geçiş için gerekli yasal düzenleme altlığının hazırlanması; DASK ve tarım sigortaları kapsamının taşkın ve kuraklık afetlerini de içermek üzere genişletilmesine ilişkin yasal düzenleme yapılması;

**Büyükşehir belediyeleri düzeyinde;** alt ölçekli planlarda (İmar Planları, İçmesuyu Havzaları Koruma Planları, Dere ve Islah Planları vb.) İklim Değişimi etkilerine duyarlılık ve dirençliliği önceleyen kentlere özgü iklim eylem planlarının hazırlanması; SUKİ Temel Kanunu olan İSKİ Kanunu'nda, yağmursuyu hizmetlerinin de SUKİ'lerce yürütülmesine ilişkin düzenleme altlığının hazırlanması; Mülkiyeti İlçe ve Büyükşehir Belediyelerine ait olan yağmursuyu şebekeleri ile ıslah edilmiş dere/sanat yapılarının bedelsiz olarak SUKİ'lere devrinin yapılması; Su, Atıksu ve Yağmursuyu Yönetimi Master Planları Hazırlanması; çevre

altyapı tesislerinin ivedilikle CBS ortamına alınması; su temini, atıksu arıtma ve yağmursuyu drenaj altyapı tesislerinin iklim değişimi etkilerine dirençli hale getirilmesi; yağmursuyu toplama ve dere ıslah sisteminde yeşil drenaj (altyapı) çözümleri ile entegrasyonun sağlanması; su tarifelerinin tam maliyet gerikazanımı esası ile belirlenmesi ve siyasi popülizm aracı olmaktan çıkarılması; kent içi derelerin taşkın yatağındaki yapıların 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkındaki Kanun kapsamında merkezi idarelerce kaldırılarak, yeşil koridorlar olarak düzenlenmesi;

**Büyükşehirler dışındaki İl ve İlçe Belediyeleri düzeyinde;** Bütün-Şehir SUKİ'leri olarak hizmet görmek üzere Türkiye SUKİ Genel Müdürlüğü kurulması veya DSİ'nin bu amaca hizmet etmek için, özel yetkileri haiz bir kamu şirketi olarak, yeniden yapılandırılması ile ilgili çalışmalar yürütülmesi; Bütün Şehir Su-Atıksu-Yağmursuyu Master Planlarının hazırlanması;

**İl Özel İdareleri düzeyinde;** Kırsal alanlardaki su-atıksu-yağmursuyu altyapı yatırımlarının DSİ ile koordineli biçimde, BM SKA16 hedeflerine uygun olarak gerçekleştirilmesi.

## 12. Kaynaklar / References

Bozkurt, D.; Turuncoglu, U.; Sen, O.L.; Önol, B.; Dalfes, B.H.N. (2011). Downscaled Simulations of the ECHAM5, CCSM3 and HadCM3 Global Models For The Eastern Mediterranean-Black Sea Region: Evaluation Of The Reference Period. *Climate Dynamics*.

Brutsaert, W., & Parlange, M. (1998). Hydrologic cycle explains the evaporation paradox. *Nature*, *396*( 30), doi:10.1038/23845.

Cüceloğlu, G. (2019). İklim Değişikliğinin İstanbul Yüzeysel Su Kaynaklarına Etkisi ve Kuraklık Dirençli Bütünleşik Su Yönetimi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programı.

ÇŞB (2021). Ulusal Yeşil Sertifika Değerlendirme Kılavuzu. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2021/06/20210609M1-3-1.pdf adresinden alınmıştır (Erişim Tarihi: 20.08.2021)

Demir, İ. (2011). Bölgesel Iklim Modeli Projeksiyonları:RCHAM5-B1. *5th Atmospheric Science Symposium*, (s. 153-160).

Dufresne, J., Foujols, M., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., . . . Brockmann, P. (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Clim. Dynamics , 40*, 2123-2165.

Eşbah Tuncay, H. (2021). *Suya Duyarlı Şehirler*, SUEN Yayınları.

Eşbah Tuncay, H. (2022). Sünger Şehirler, *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik Dergisi*, 1(2) 101–108.

Erşahin, M.E., Güven, H. & Öztürk, İ. (2022). *Atıksu Arıtma Tesisinden Atıksu Rafinerisine*. M. Bulut ve C. Korkut (Eds). *Döngüsel Ekonomi ve Sürdürülebilir Hayat* (s. 385-410). Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları.

Hagemann, S., Chen, C., Clark, D. B., Folwell, S., Gosling, S. N., Haddeland, L., Hanasaki, N., Heinke, J., Ludwig, F., Voss, F., Wiltshire, A. (2013). Climate change impact on available water resources obtained using multiple global climate and hydrology models. *Earth System Dynamics, 4*, 129-144.

IMC (1999). İstanbul Su Temini, Atıksu ve Yağmursuyu Tesisleri Master Planı.

IPPC (2014). Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf adresinden alınmıştır. (Erişim Tarihi: 18.09.2022)

IPPC (2021). Climate Change 2022 Mitigation of Climate Change Sixth Assessment Report, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Full_Report.pdf adresinden alınmıştır. (Erişim Tarihi: 18.09.2022)

İBB (2021). İstanbul İklim Değişikliği Eylem Planı, https://cevre.ibb.istanbul/wp-content/uploads/2022/01/ist_iklim_degisikligi_eylem_plani.pdf adresinden alınmıştır. (Erişim Tarihi: 18.09.2022)

İSKİ (2021). İstanbul İçmesuyu ve Kanalizasyon Master Planı Hazırlanması İşi, İSKİ Master Plan Ortak Girişimi, Yüksel Proje, Dolsar Mühendislik, Royal HaskoningDHV.

Karaca, M.; Ünal, Y.S.; Goksel, C. (2000). Effects of urbanization on the regional climate: Example of Istanbul. *ECAC2000 3rd European Conf. On Applied Climatology.*

Kurnaz, L. (2014). Kuraklık ve Türkiye. *IPM-Mercator Politika Notu*. Sabancı Üniversitesi.

Leong, J., Balan, P., Chong, M., & Poh, P. (2019). Life-cycle assessment and life-cycle cost analysis of decentralised rainwater harvesting, greywater recycling and hybrid rainwater-greywater systems. *Journal of Cleaner Production (229)*, 1211-1224.

Nowak, O., Keil, S., & Fimml, C. (2011). Examples of energy self-sufficient municipal nutrient removal plants. *Water Science & Technology*, *64*(1), 1-6.

OSİB (2016). İklim Değişikliğinin Su Kaynakları Üzerindeki Etkileri Projesi. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. Ankara.

Önal, B. (2012). Effects of Coastal Topography on Climate: High-Resolution Simulation with a Regional Climate Model. *Climate Research*.

Önol, B.; Fredrck, H; Semazzi, M.; Ünal, Y.S., Dalfes H.N (2006). Regional Climatic Impacts of Global Warming over the Eastern Mediterranean. *International Conference on Climate Change and the Middle East:Past, Present and Future.* İstanbul.

Önol, B., & Semazzi, F. (2009). Regionalization of climate change simulations over the eastern Mediterranean. *Journal of Climate, 22*, 1944-57.

Öztürk, İ. (2020a). *Su İklim Değişimi ve Ortak Geleceğimiz*, SUEN Yayınları.

Öztürk, İ., Kınacı, C., Ateş Genceli, E., Özgün, H., Cüceloğlu, G., Çiçekalan, B., Özababalı Sabuncugil, A. (2020b). *Çevre Ekonomisi Tam Maliyet Esaslı Tarife Hesabı (el kitabı)*, TBB Yayınları.

Sarıkaya H., (2017). Kentsel Su ve Atık Su Yönetiminde Master Planlama (yayınlanmamış özel rapor)

Shen, X. (2010), Flood Risk Perception and Communication Within Risk Management in Different Cultural Contexts: A Comparative Case Study Between Wuhan, China, and Cologne, Germany.

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Marquis, M., Averyt, K., Tignor, M., . . . Chen, Z. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* Cambridge: Cambridge University Press.

SYGM. (2013). Su Yönetimi Genel Müdürlüğü Bilgi İşlem Daire Başkanlığı'ndan temin edilen veriler.

Şen, Ö.L.; Bozkurt, D.; Göktürk, O.M., Dündar, B., Altürk, B. (2013). Türkiye'de İklim Değişikliği ve Olası Etkileri. *3.Ulusal Taşkın Sempozyumu.*

TÜBİTAK MAM. (2010). *Havza Koruma Eylem Planları.* T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı adına TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi.

Toros, H. (2012). Spatio-Temporal Variation of Daily Extreme Temperatures over Türkiye. *International Journal of Climatology*, *32*(9) 1047-1055.

URL-1 <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change/> (Erişim Tarihi: 18.09.2022).

Ünal, Y.S.; Deniz, A.; Toros, H.; Incecik, S. (2012). Temporal and Spatial Patterns of Precipitation Variability for Annual, Wet, and Dry Seasons in Türkiye. *International Journal of Climatology (32)*, 392-405.

Ünal, Y.; Tan, E.; Mentes, S. (2013). Summer Heat Waves over Western Türkiye between, *Theoretical and Applied Climatology (112)*, 339–350 1965-2006.

## Yazarlar Hakkında / About Authors

**Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK | TÜBA Şeref Üyesi | İstanbul Teknik Üniversitesi | ozturkiz[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0002-8274-5326**

İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) İnşaat Fakültesi'nden 1976 yılında mezun oldu. 1978 yılında İTÜ Çevre Bilimleri ve Teknolojisi Anabilim Dalı'nda asistan olarak göreve başladı. İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümü'nden, 1979 yılında Yüksek İnşaat ve Çevre Mühendisliği ve 1982 yılında Doktora derecelerini aldı. 1982-1984 yılları arasında İngiltere Newcastle Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde doktora sonrası araştırmalarda bulundu. 1994 yılında TÜBİTAK Bilimsel Araştırma ve Teşvik ödülüne layık görüldü, ardından aynı yıl İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümü'nde Profesörlük kadrosuna atandı. Su ve atıksu arıtımı, bütünleşik su havzaları yönetimi, entegre katı atık yönetimi ve iklim değişiminin su kaynaklarına etkileri alanlarında uluslararası düzeyde uzmanlığı olan Öztürk'ün, ağırlıklı olarak uluslararası olmak üzere 350'den fazla bilimsel yayını, 17 kitabı ve çok sayıda araştırma/uygulama projesi raporu bulunmaktadır, Öztürk, Türkiye Bilimler Akademisi şeref üyesi ve İTÜ Yönetim Kurulu üyesidir. Bir dönem TÜBİTAK KAMAG GYK ve TÜBİTAK Bilim Kurulu üyelikleri de yapan Öztürk, 2015-2020 döneminde İSKİ Yönetim Kurulu üyeliği görevi yapmıştır.

**Prof. Dr. İzzet ÖZTÜRK | TÜBA Honorary Member | Istanbul Technical University | ozturkiz[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0002-8274-5326**

He is graduated Istanbul Technical University (ITU) Civil Engineering Faculty in 1976. Afterwards, he attended ITU Environmental Sciences and Technology Division in 1978 as an Assistant. He received Environmental and Civil Engineering M.Sc. degrees in 1979, and Ph.D. degree in 1982 at ITU Environmental Engineering Department. During 1982-1984, he completed post-doctoral studies at the Newcastle University Environmental Engineering Department in UK. He achieved TR TUBİTAK's Scientific Research and Encouragement award in 1994, then he was enrolled as a Professor in ITU Environmental Engineering Department. He has international expertise in the fields of water and wastewater treatment, integrated watershed management, integrated solid waste management, effects of climate change on water resources, anaerobic digestion, and industrial pollution control. He withholds more than 350 scientific publications, 17 books, and many research/implementation Project reports mainly with international reputation. Öztürk is an honorary member of the Turkish Academy of Sciences (TÜBA), a member of International Water Association (IWA), and a member of ITU Administrative Committee. Prof. Öztürk, who was a member of TÜBİTAK KAMAG (Public Research Group), and a member of Science Board of TUBİTAK for a while, was a member of İSKİ Board of Management between 2015-2020.

**Dr. Gökhan CÜCELOĞLU | Gebze Teknik Üniversitesi |**
**cuceloglu[at]gtu.edu.tr | ORCID: 0000-0002-9534-250X**

Gökhan, İTÜ İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nden 2010 yılında mezun olmuştur. Yüksek Lisans (2013) ve doktora (2019) çalışmalarını İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümü'nde tamamlamış ve 2011-2019 yılları arasında yine aynı bölümde araştırma görevlisi olarak çalışmıştır. Doktora çalışmaları sırasında İsviçre Federal Su Araştırmaları Bilimi ve Teknolojileri Enstitüsü'nde (EAWAG) bir yıl süre ile (2015-2016) misafir araştırmacı olarak bulunmuştur. Doktora çalışmasında iklim değişiminin İstanbul'un su kaynaklarına olası etkisini araştırmıştır. Akademik çalışmalarının yanı sıra üniversite, devlet kurumları ve özel şirketler ile çalışarak çeşitli su kaynakları projelerinde modelleme uzmanı olarak çalışmıştır. 2020-2022 yılları arasında Oxford Üniversitesi (Environmental Change Institute) araştırmacı kadrosunda yer alarak İngiltere ve Galler ulusal su kaynakları modelleme ve planlama projelerinde görev almıştır. Bu çalışmaya ek olarak, Oxford Üniversitesi Oxford Martin Programme on Transboundary Resource Management araştırma grubu içerisinde Ürdün Havzası'nda su, enerji ve iklim sistemleri modelleme ve sınır aşan kaynakların yönetimi çalışmalarında yer almıştır. 2021-2023 yılları arasında "OPTAIN - OPtimal strategies to retAIN and re-use water and nutrients in small agricultural catchments across different soil-climatic regions in Europe" H2020 projesinde araştırmacı olarak çalışmıştır. 2023 yılında itibaren Gebze Teknik Üniversitesi Yer ve Deniz Bilimleri Enstitütüsü'nde Dr. Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır. Genel çalışma konuları arasında iklim değişimi, hidroloji, su kaynakları modellemesi, su kalitesi ve havza yönetimi konuları yer almaktadır.

**Dr. Gökhan CÜCELOĞLU | Gebze Teknik Üniversitesi |**
**cuceloglu[at]gtu.edu.tr | ORCID: 0000-0002-9534-250X**

Gökhan holds a bachelor's degree (2010) in Environmental Engineering from Istanbul Technical University (ITU), Türkiye. He also obtained his master (2013) and PhD degree (2019) from the Environmental Science and Engineering Program at the same university, where he was also a research assistant (2011-2019). He was also a guest PhD researcher (2015-2016) in Systems Analysis, Integrated Assessment and Modeling at EAWAG, Zürich. During his PhD, he focused on the climate change impacts on the surface water resources of Istanbul and built a regional water resource system model for resilient drought and water scarcity management in the city. Alongside his academic studies, he has collaborated actively with government agencies and private sectors in numerous water resources projects. Gokhan was a research associate (2020-2022) at Environmental Change Institute, the University of Oxford, and his research focused on national-scale water resource modeling and drought management plans for Wales and England. In addition, he was a research fellow (2020-2022) at The Oxford Martin Programme on Transboundary Resource Management, working on transboundary water, energy and climate systems modelling in the Middle East (Jordan River Basin). He participated to EU-funded research and innovation H2020 project titled "OPTAIN - OPtimal strategies to retAIN and re-use water and nutrients in small agricultural catchments across different soil-climatic regions in Europe" between 2021 and 2023. Currently, Gokhan works as an assistant Professor at Earth and Marine Sciences, Gebze Technical University. His main research interests lie in the different research themes of integrated watershed management, including climate change, hydrology, water resource modeling and water quality.

**Araştırma Görevlisi Elif Zeynep DENERİ | İstanbul Teknik Üniversitesi | deneri[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0001-7190-737X**

İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ) Çevre Mühendisliği Bölümü'nden 2017 yılında mezun oldu. İTÜ Çevre Bilimleri, Mühendisliği ve Yönetimi programında eğitim gördü ve "Demiryollarından Kaynaklanan Çevresel Gürültünün İncelenmesi ve Değerlendirilmesi: Marmaray Örneği" başlıklı yüksek lisans tezini 2022 yılında tamamladı. 2022'nin Şubat ayından bu yana İTÜ Çevre Mühendisliği Birimi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmakta ve İTÜ Çevre Bilimleri, Mühendisliği ve Yönetimi programında doktora eğitimine devam etmektedir.

**Research Assistant Elif Zeynep DENERİ | Istanbul Technical University | deneri[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0001-7190-737X**

She graduated from Istanbul Technical University (ITU) Environmental Engineering Department in 2017. She was educated in ITU Environmental Sciences, Engineering and Management program and completed her master's thesis titled " Investigation and Assessment of Environmental Noise arising from Railways: The case of Marmaray" in 2022. She has been working as a Research Assistant at ITU Environmental Engineering Department since February 2022 and continues her doctorate education in ITU Environmental Sciences, Engineering and Management program.

# SU, ATIKSU ARITIMI
# VE
# YENİDEN KULLANIMI

## WATER, WASTEWATER TREATMENT AND REUSE

*İsmail KOYUNCU*
*Mehmet Emin PAŞAOĞLU*
*Türker TÜRKEN*
*Ayşe YÜKSEKDAĞ*

DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch10

# SU, ATIKSU ARITIMI VE YENİDEN KULLANIMI

***İsmail KOYUNCU***
*İstanbul Teknik Üniversitesi*

***Mehmet Emin PAŞAOĞLU***
*İstanbul Teknik Üniversitesi*

***Türker TÜRKEN***
*İstanbul Teknik Üniversitesi*

***Ayşe YÜKSEKDAĞ***
*İstanbul Teknik Üniversitesi*

**Özet**

Dünya çapında hızlı nüfus artışı ve beraberinde getirmiş olduğu çevresel etkiler incelendiğinde su kaynaklarının korunmasının en kritik konuların başında geldiği görülmektedir. Yeryüzündeki suların %97,5'i okyanuslarda, denizlerde ve göllerde bulunur. Tatlı sular bu miktarın sadece %2,5'ini oluştururken bu suyun da üçte ikisi buzullardır. Dünya yüzeyini kapsayan suların sadece %0,3'ü içilebilir sudur. Nüfusun, endüstriyel ve tarımsal su kullanımının artmasıyla, limitli temiz su rezervleri üzerindeki stres de ciddileşmektedir. Arz ve talebin birbirini karşılamamasına "su kıtlığı" denmekte ve günümüzde küresel bir sorun olarak görülmektedir. Su kıtlığı; su stresi, su sıkıntısı veya noksanlığı ve su krizini kapsamaktadır. Mevcut su kaynaklarının kullanımın her geçen gün arttığı göz önüne alındığında alternatif su kaynaklarının oluşturulmasına ihtiyaç duyulduğu ve alternatif su temin yöntemlerinden en yaygın kullanılan ve potansiyeli en yüksek olan proseslerin membran içerenler olduğu görülmektedir. Özellikle atıksuların geri kazanımında kullanılan membran biyoreaktör (MBR)'ler ve deniz suyundan içme ve kullanma suyunda kullanılan ters osmoz prosesleri alternatif su kaynağı oluşturmada dünyada ve ülkemizde gelecek vaat eden prosesler olarak yerini almakta ve kullanımları yaygınlaşmaktadır. Çok yakın gelecekte önemi daha da hissedilecek olan membranların kullanıldığı alternatif su temin yöntemlerinin yerli ve milli olarak üretilmesi de üzerinde durulması gereken bir diğer önemli husustur.

***Anahtar Kelimeler***
*Su kıtlığı, Su ve atıksu arıtımı, Su geri kazanımı, Membran biyoreaktörler*

# WATER, WASTEWATER TREATMENT AND REUSE

***İsmail KOYUNCU***
*Istanbul Technical University*

***Mehmet Emin PAŞAOĞLU***
*Istanbul Technical University*

***Türker TÜRKEN***
*Istanbul Technical University*

***Ayşe YÜKSEKDAĞ***
*Istanbul Technical University*

**Abstract**

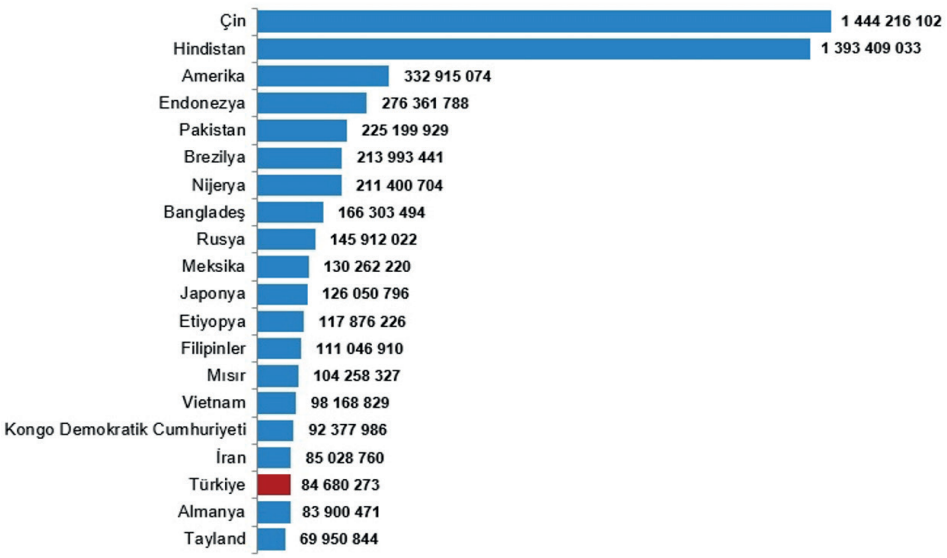
When the rapid population growth and the environmental effects it brings with it are examined, it is seen that the protection of water resources is one of the most critical issues. 97.5%of the water on earth is found in oceans, seas, and lakes. While fresh water makes up only 2.5%of this amount, 2/3 of this water is glaciers. Only 0.3%of the water covering the earth's surface is potable water. As population and agricultural and industrial water use increase, the pressure on limited water resources is deepening. Imbalances between supply and demand create a global problem called water scarcity. Water scarcity includes water stress, water shortage or lack, and water crisis. Given that the demand for existing water resources is growing with time, it is obvious that alternative water resources must be supplied. Among these alternative water supply methods, membrane-containing processes are the most popular and have the greatest potential. Especially, membrane bioreactors (MBRs) used in the reuse of wastewater and reverse osmosis processes used in drinking and utility water from sea water take their place as promising processes in worldwide and in our country in creating an alternative water source and their use is becoming widespread. Local and national production of alternative water supply methods using membranes, the importance of which will be felt much more in the near future, is another significant issue that needs to be focused.

***Keywords***
*Water scarcity, Water and wastewater treatment, Water recovery, Membrane bioreactors*

## 1. Giriş

Dünya Bankası istatistiklerine göre Dünya nüfusu 2000'li yılların başında 6,1 milyar iken, 2020 yılı itibariyle 7,8 milyara yaklaşmıştır (TÜİK, 2022). Nüfustaki hızlı artış neticesinde su, gıda ve enerji talebinin karşılanmasıyla ilgili sorunlar meydana gelmiştir. Nüfus tahminlerine göre Çin yaklaşık 1 milyar 444 milyon kişi ile en yüksek nüfusa sahip ülke olarak birinci sırada yer alırken, 1 milyar 393 milyon kişi ile Hindistan ikinci ve yaklaşık 333 milyon kişi ile Amerika üçüncü sırada yer almaktadır (Şekil 1). Bu üç ülke, dünya toplam nüfusunun %40,3'ünü oluşturmaktadır. Türkiye, 195 ülke arasından 84 milyon kişi ile nüfus büyüklüğüne göre 18. sırada yer alırken, dünya nüfusunun toplamda %1,1'ini oluşturmaktadır (TÜİK, 2022).

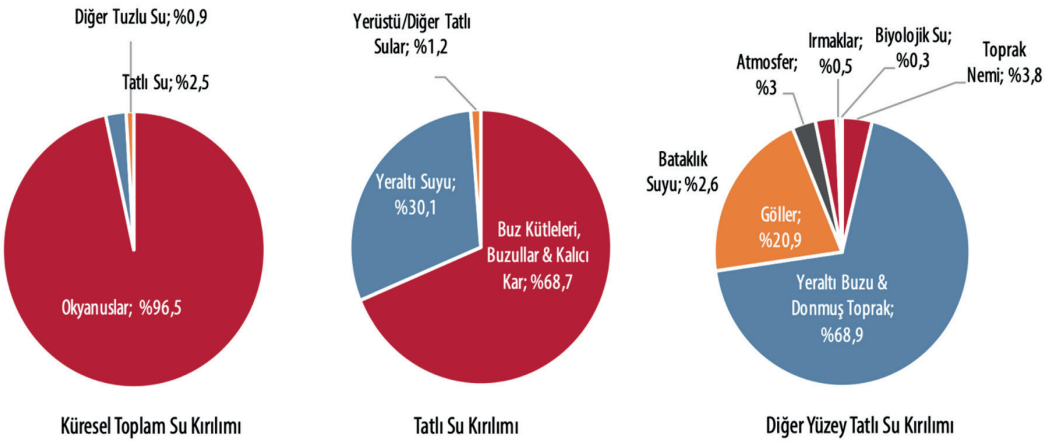
21. yüzyıldaki nüfus artışı ve beraberindeki sorunlara iklim değişikliğinin meydana getirdiği çevresel etkiler de eklendiğinde, su konusu pek çok boyutuyla ön plana çıkmaktadır. Günümüzde dünya ölçeğinde su ve suyla ilgili ortaya çıkan sorunlar en kritik öneme haiz konuların başını çekmektedir (Tzanakakis vd., 2020). Su sadece yerküremizde hayatın devamlılığını sağlayan temel madde olmayıp, bunun yanında insan kullanımında da birincil maddedir. Her geçen gün artan su talebinin karşılanması, su azlığı/kıtlığı, güvenliği ve yönetimi gibi temel konular; tekil ya da bütünleşik olarak özellikle arazi örtüsü ve iklim değişikliği, kentleşme ve göç konularıyla birlikte incelenen en önemli araştırma konuları içerisindedir (Sarış, 2021). Şüphesiz suyu önemli hale getiren diğer unsurlar da suyun kalkınmaya etkisidir. Artan dünya nüfusu ile her alanda üretimin artması suyun önemini daha da arttırmıştır. Uygun kalitede su temini de buna paralel olarak artmıştır. Su temini için gerekli enerji, dünya genelindeki enerji tüketiminin toplamda %10'una karşılık gelmektedir (Koyuncu, 2016).




***Şekil 1.*** *Dünyadaki en kalabalık nüfusa sahip ilk 20 ülke (TÜİK, 2022).*

## 2. Dünya'da Suyun Dağılımı ve Su Kıtlığı Durumu

Yeryüzündeki suların %97,5'i okyanuslarda, denizlerde ve göllerde bulunur. Tatlısular bu miktarın sadece %2,5'ini oluştururken, bu suyun da 2/3'ü buzullardadır. Dünya yüzeyini kapsayan suların sadece %0,3'ü içilebilir sudur. Dünyada tatlı su kaynakları 108.000 $km^3$ iken, içilebilir su kaynakları sadece 47.000 $km^3$'tür. Ekosistemlerin devamlılığı açısından dünyadaki kullanılabilir tatlı sular önem arz etmektedir. Tuzlu deniz suyunun insanların temiz su ihtiyacını karşılaması mümkün olmadığı gibi, karalardaki suyun yalnızca %10'luk miktarı tatlı su olarak sınıflandırılmaktadır. Bu miktar da 5.500 $km^3$'e tekabül etmektedir. Bu miktarın gelecekte su ihtiyacı açısından sorunlara sebep olacağı aşikardır (Şekil 2).




***Şekil 2.*** *Yeryüzündeki su kaynakları dağılımı (TSKB, 2019).*

Yeryüzündeki su genellikle tarımsal sulamada, enerji üretiminde, sanayide ve evsel kullanım amaçlı tüketilmektedir. Dünya üzerindeki su kaynaklarının ~%69'u tarımsal sulama amaçlı tüketilmektedir. Bu oranı %19 ile sanayi kullanımı (ticari, enerji ve endüstriyel sektörler) ve %12 ile evsel kullanım takip etmektedir (Aquastat, 2018). Birleşmiş Milletler verileri incelendiğinde, küresel ölçekte su tüketiminin son 100 yılda yaklaşık altı katına çıktığı görülmektedir (Wada vd., 2016). Nüfus artışına paralel olarak meydana gelen ekonomik gelişmeler, sürekli değişkenlik gösteren tüketici yapısı ve diğer bazı faktörler nedeniyle su tüketiminin artmaya devam edeceği beklenmektedir (TSKB, 2019).

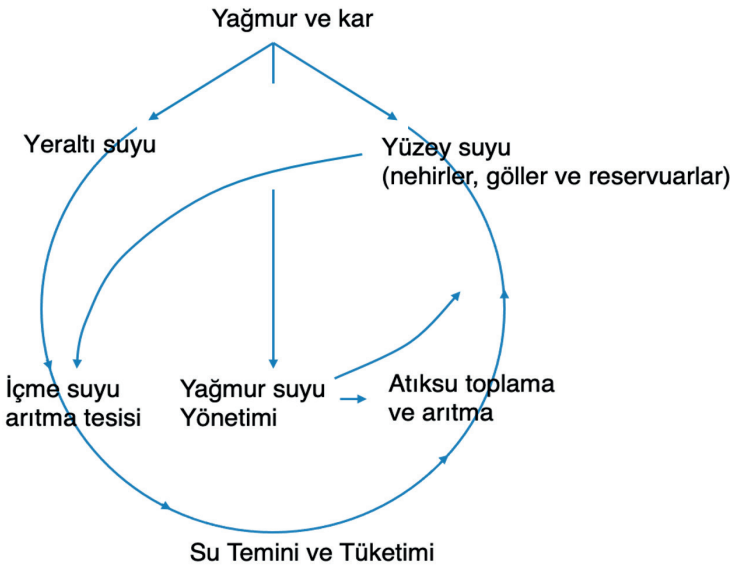
Suyun milli zenginliğimize destek oluşturan tarım ürün ve hizmetlerinin devamı için temel esaslardan birini oluşturduğu çok açıktır. Suyu en çok tüketen sektörler incelendiğinde küresel bazda tarım sektörünün ilk sırada yer aldığı görülmektedir.

Buna ek olarak, tarımda kullanılan suyun verimi de çok düşüktür. Tarımda suyun en çok kullanıldığı durumların sulama, mahsül soğutma ve don kontrolü, böcek ilacı hazırlanması ve gübre uygulamaları olduğu bilinmektedir.

Dünya Bankası verileri göz önüne alındığında, dünyada birçok bölgede tatlı suyu kaynaklarının %70'ten fazlasının tarımsal sulama için kullanıldığı görülmekle birlikte, bu oranın ülkeler arasında büyük ölçüde değişiklik gösterdiği sonucu ortaya çıkmaktadır. Bilhassa gelişmekte olan ülkeler de dahil olmak üzere birçok ülke için, Gayrisafi Yurtiçi Hasıla (GSYH)'ya etkisi minimum olan tarım sektörü, su tüketimiyle birinci sırada yer almaktadır (TSKB, 2019).

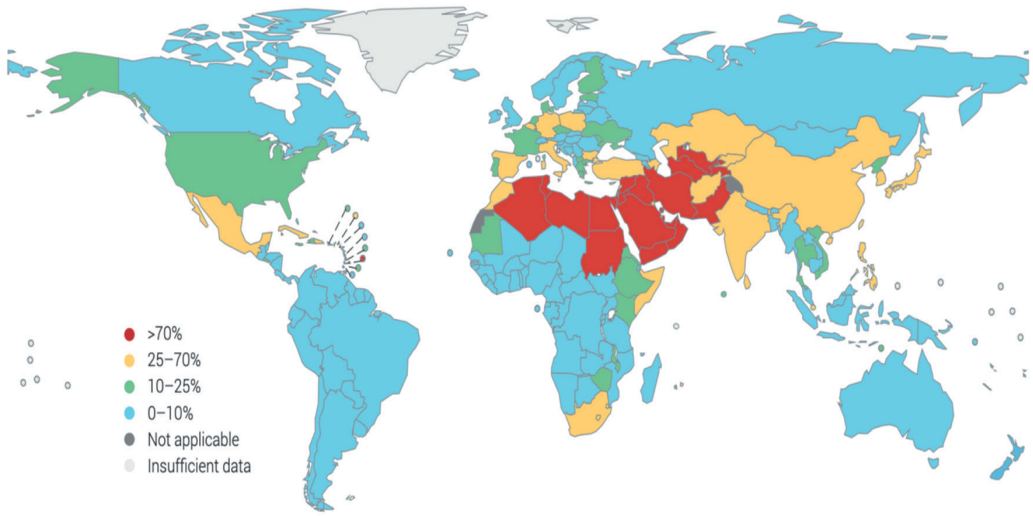
Öte yandan ticari ve endüstriyel sektörler yeryüzündeki en fazla su tüketen sektörler arasında ikinci sıradadır. Ticari ve endüstriyel faaliyetler küresel çapta su tüketiminin yaklaşık %20 'sini oluşturmaktadır. Yine tarım sektöründe olduğu gibi ticari ve endüstriyel sektörlerde de su kullanımı ülkeler arasında değişiklik göstermektedir. Örneğin, gelişmiş ülkelerde ticari ve sanayi sektörlerindeki su kullanım oranı %50 seviyelerindeyken, tarım sektöründeki su kullanımı nispeten daha azdır (TSKB, 2019).

Suyun doğadaki çevrimi (ya da su döngüsü), suyun bulunduğu halden buhar hale geçerek atmosfere yükselmesi ve tekrar yoğunlaşarak yeryüzüne düşmesi sırasında takip ettiği değişimlerdir (Şekil 3). Karaya düşen suyun yaklaşık %65-70'i zeminden ve su yüzeylerinden buharlaşırken (evaporasyon), bitki yüzeylerinden terleme (evapotranspirasyon) ile de atmosfere su buharı gönderilir. Düşen yağmurun diğer bir kısmı da süzülerek yeraltı sularına karışır. Süzülen suyun bir bölümü ise yeraltı su tablasına kadar (doygun bölge yüzeyi) sızar. Buna perkolasyon denmektedir. Sızan su doygun bölgede yatay olarak hareket ederek yeraltı suyu akışı veya taban akışı adını alır. Yeraltı suyu aracılığıyla da yüzeysel sulara karışarak denize ulaşır ve deniz yüzeyinden tekrar atmosfere buharlaşır. Su çevrimi, canlı hayatı için kritik bir önem taşır.




***Şekil 3.*** *Klasik Su Çevrimi*

Su kaynakları üzerindeki baskı nüfus, endüstriyel ve tarımsal su kullanımı arttıkça daha da artmaktadır. Su kıtlığını tetikleyen ve küresel bir sorun haline getiren husus ise arz ve talep arasındaki dengesizliklerdir. Su kıtlığı uluslararası literatürde "tüm su kullanıcılarının, yürürlükteki kurumsal düzenlemeler çerçevesinde, suyun tedarikine veya kalitesine yönelik taleplerinin tam olarak karşılanamayacağı nokta" şeklinde tanımlanmakta olup; su stresi, su sıkıntısı ya da noksanlığı ile su krizi ifadelerini de kapsamaktadır.




***Şekil 4.*** *Fiziksel su stresi seviyesi (WWAP, 2019)*

Su kıtlığı kavramı temel olarak iki ana başlıkta incelenebilir: ekonomik su kıtlığı ve fiziksel su kıtlığı. "Ekonomik su kıtlığı" mevcut ve yeterli su rezervlerinin iyi yönetilememesi sonucu meydana gelirken "fiziksel su kıtlığı" belirli bir bölgedeki talebin karşılanmasında doğal su kaynaklarının yetersiz olması durumudur. Su kıtlığını genellikle az yağış alan bölgelerde meydana gelen insani faaliyetler örneğin: nüfus yoğunluğu, turist girişi vb., ile ortaya çıkmakta ve buna ek olarak yoğun tarım ve yüksek miktarda su talep eden sektörlerin varlığı ile sorun derinleşmektedir (Şekil 4).

Bu bağlamda dünya geneline bakıldığında 2 milyardan fazla insanın yüksek su stresi yaşayan ülkelerde yaşadığı görülmektedir. Küresel çapta ortalama su stresi sadece %11 olmakla birlikte, 31 ülke %25 (asgari su stresi eşiği olarak tanımlanır) ile %70 arasında su stresi yaşamakta ve 22 ülke %70'in üzerindedir ve bu nedenle ciddi su stresi altındadır (United Nations, 2018). Dünya genelinde artan su stresi potansiyel kaynaklar üzerinde sürdürebilirliği tehdit etmekte ve kullanıcılar arasında çatışmalar çıkabilmesine neden olabileceğini işaret etmektedir.

Ekonomik İş birliği ve Kalkınma Örgütü'nün (OECD) "2050 Çevresel Görünüm: Eylemsizliğin Sonuçları" raporuna göre, dünya çapında su talebinin 2000 ile 2050 yılları arasında %55 oranında artması ve evsel kullanım, imalat, elektrik üretimi ve diğer ekonomi sektörlerinin

tarım ve ekosistemlerle kaynaklara erişim için rekabet etmesi nedeniyle gerilimlerin artması beklendiği belirtilmektedir. Ayrıca OECD 2050 yılına kadar, küresel nüfusun %40'ından fazlasının şiddetli su stresi altında nehir havzalarında yaşamasının muhtemel olduğunu bildirmektedir.

Küresel su ihtiyacının 2000 yılında 3500 $km^3$ iken 2050 yılında 5500 $km^3$'e ulaşması öngörülmektedir. Bu %55'lik artış daha çok enerji üretimi ve evsel kullanım amaçlı su tüketimine bağlanmaktadır. Bu bakımdan mevcut su kaynaklarının şimdiden verimli kullanılması ve kullanılmış suların yeniden kullanımı daha da önem arz edecektir. Su geri kazanım teknolojilerine yapılan yatırımların arttırılması, ileride yaşanacak bu su kıtlığını en aza indirebilecektir. Atıksuların yeniden kullanımı ve desalinasyon teknolojileri, alınabilecek üretim bazlı önlemlerdendir (Koyuncu, 2016).

Her geçen gün dünyada daha da önemli bir gündem haline gelen su kıtlığının yaygınlaşarak daha büyük oranda bir nüfusu etkilemesi beklenmektedir. Bu etkilerin minimize edilmesi amacıyla geçtiğimiz yıllarda hem kamu hem de özel sektörde su kıtlığı ile ilgili yürütülen araştırmalar artırılmıştır. Bu bağlamda su kıtlığının dünyadaki mevcut durumunu gösteren farklı göstergeler oluşturulmuştur. Bu göstergeler aşağıda açıklanmıştır.

### 2.1 Falkenmark Göstergesi

Su stresinin ölçümünde en yaygın olarak kullanılan göstergelerden bir tanesi 1989 yılında İsveçli su uzmanı Malin Falkenmark tarafından geliştirilmiştir. Falkenmark Göstergesi, yıllık bazda su kullanılabilirliğinin ülke/bölgedeki kişi başına düşen miktarı ölçümüne dayanmaktadır. Falkenmark Göstergesi ilgili ülke ya da bölgenin hali hazırdaki su kaynaklarının o ülke ya da bölgede yaşayan kişi sayısına olan oran ile hesaplanır (Falkenmark vd., 1989). Tablo 1 incelendiğinde su stresi ve kıtlığı durumları için belirlenen sınıflandırmalar görülmektedir.

***Tablo 1.*** *Falkenmark Su Kıtlığı Göstergesi (Falkenmark vd., 1989).*

| **Falkenmark Su Kıtlığı Göstergesi ($m^3$/kişi/yıl)** | **Sınıf** |
|---|---|
| > 1700 | Stressiz |
| 1000-1700 | Su Stresi |
| 500-1000 | Kıtlık |
| < 500 | Kesin Kıtlık |

### 2.2. Kullanım-Mevcudiyet Oranı (KMO)

Su kıtlığının boyutlarını belirlemede uygulanan bir diğer yöntem de kullanım-mevcudiyet oranıdır (KMO) (Damkjaer ve Taylor, 2017). KMO değeri, belirli bir bölgeye ait yıllık toplam kullanımın, yıllık toplam su mevcudiyetine oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Bölgesel ölçekler incelendiğinde, KMO'su %20-%40 arasında bulunan bölge "Orta Riskli", %40'ın üzerinde olması durumunda ise o bölge "Yüksek Riskli" olarak tanımlanmıştır (Tablo 2).

***Tablo 2.*** *Kullanım-Mevcudiyet Oranı (KMO) Sınıfları (Damkjaer ve Taylor, 2017).*

| **Endeks (%)** | **Sınıf** |
|---|---|
| < %10 | Minimum Risk |
| %10 – %20 | Düşük Risk |
| %20 – %40 | Orta Risk |
| > %40 | Yüksek Risk |

Falkenmark Göstergesi nüfus ile ters orantıya sahip olsa da hem Falkenmark Göstergesi hem de nüfusu yüksek ülkeler de bulunmaktadır. Falkenmark Göstergesi'nde bulunan değer ne kadar yüksek ise risk durumu o kadar iyidir. Tablo 3 incelendiğinde, Brezilya, ABD ve Rusya gibi kalabalık nüfusa sahip ülkelerin Falkenmark Göstergesi'nin yüksek olduğu ve bu ülkelerin su stresi çekmediği görülmektedir. Yüksek oranda orman muhteviyatı bulunan Kanada ise nispeten düşük nüfusundan dolayı en yüksek Falkenmark Göstergesi'ne sahip ülkedir.

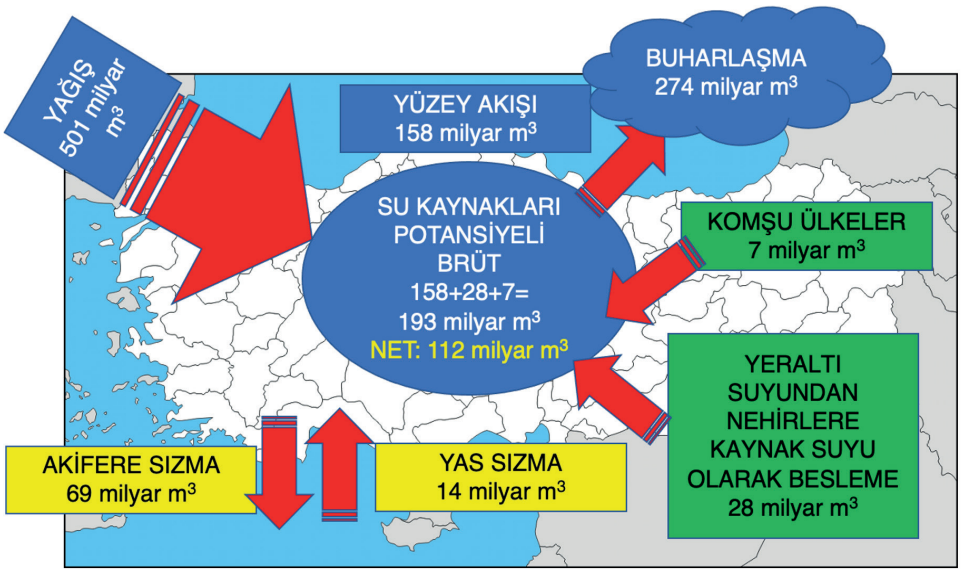
***Tablo 3.*** *Seçilmiş Ülkelerin Falkenmark Göstergeleri (TSKB, 2015).*

| **Ülke** | **Yenilenebilir Tatlı Su Kaynağı (milyon m3)** | **Nüfus** | **Falkenmark Göstergesi (2015)** |
|---|---|---|---|
| Kanada | 2.902.000 | 35.832.513 | 80.988 |
| Brezilya | 8.233.000 | 205.962.108 | 39.973 |
| Rusya Federasyonu | 4.525.000 | 144.096.870 | 31.402 |
| Amerika Birleşik Devletleri | 3.069.000 | 321.039.839 | 9.560 |
| İsviçre | 51.173 | 8.327.666 | 6.212 |
| Almanya | 132.000 | 81.197.537 | 1.626 |
| Türkiye | 111.990 | 78.741.053 | 1.422 |
| İsrail | 1.800 | 8.380.100 | 215 |

## 3. Ülkemiz Su Potansiyeli ve Mevcut Durum

Dünya genelinde su kaynakları %70 oranında en fazla tarımda kullanılmakla birlikte, bu kullanımı elektrik üretimi ile buhar bazlı elektrik tüketiminde kullanılan soğutma suları takip etmektedir (Koyuncu, 2016). Kara ekosistemlerini besleyen en büyük su kaynağı yağışlardır. Yeryüzüne düşen yıllık toplam yağış miktarı 119.000 $km^3$ iken, 42.600 $km^3$ yüzeysel akışla denizlere, nehirlere ve göllere ulaşır ve 2.200 $km^3$ su ise yeraltı sularına karışmaktadır (TÜSİAD, 2008). Türkiye'de ise yıllık yağış miktarının 501 milyar $m^3$ olduğu ifade edilmektedir (Şekil 5). Bu yağışla düşen suyun 158 milyar $m^3$'ü yüzeysel sulara karışırken, 69 milyar $m^3$'lük kısmı da yeraltı sularına karışmakta ve ~274 milyar $m^3$'lük kısmı atmosfere geri dönmektedir (DSİ, 2006; Günay, 2011). Bir bölgenin su potansiyeli o bölgenin enlem, boylam, bitki örtüsü, topoğrafik yapı vs. gibi etkenlerden etkilenmektedir. Ülkemizde de bu faktörler bölgelere göre farklılık

gösterdiğinden su potansiyeli de asimetrik bir dağılım göstermektedir. Ülkemizde kullanılabilir yıllık su miktarı 2000 yılında kişi başı ~1650 $m^3$, 2009 yılında ~1540 $m^3$, 2020 yılında ise ~1350 $m^3$ olarak kayıtlara geçmiştir. Türkiye, nüfus başına düşen kullanılabilir su miktarına göre, su stresi yaşayan ülkeler kategorisinde bulunmaktadır (DSİ, 2010).




***Şekil 5.*** *Türkiye'nin su potansiyeli (DSİ, 2015).*

### 3.1. Ülkemizde Yakın Gelecekte Beklenen İklimsel Değişiklikler

Yapılan gözlemler, küresel ölçekte bir iklim değişikliğine işaret etmektedir. Küresel ortalama sıcaklıkların yaklaşık 1 °C artması ve buzulların erimesi, deniz seviyesinin yaklaşık 17 cm yükselmesi, iklim değişikliğini gösteren değişimlerdir. Türkiye Akdeniz Havzası'nda bulunmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) değerlendirme raporunda Akdeniz havzasının iklim değişikliğine karşı en savunmasız bölgelerden biri olduğu rapor edilmiştir. Bu bölgede 21. yüzyılın son dönemleri için hazırlanan iklim değişikliği senaryolarına göre, sıcak hava dalgaları ve şiddetli yağışların gözlemleneceği, kuraklığın artacağı, Akdeniz havzasında yağışlar azalırken, Karadeniz'de artış göstereceği beklenmektedir (Usta, 2016).

## 4. Suyun Ekonomik ve Politik Açıdan Durumu

Ülke ekonomileri açısından doğal kaynakların kullanımı önem arz etmektedir. Su da bir doğal kaynak olarak ekonomi açısından tarım başta olmak üzere, endüstri, içme ve kullanma, halk sağlığı, ulaşım, rekreasyon, turizm, enerji üretimi vs. alanlarında öneme sahiptir (Taşdemir ve Koyuncu, 2021). Özellikle son dönemde endüstrileşmenin artması ile su kaynaklarının kullanımı ve önemi daha da artmıştır. Henüz suyun yerine geçebilecek maliyet açısından eşdeğer veya daha az maliyetli başka bir kaynak bulunamamıştır (Yılmaz ve Peker, 2013). Diğer bir deyişle su, ekonomik açıdan vazgeçilmez bir kaynaktır.

Suyun politik önemi incelendiğinde ise tarih boyunca ülkeler doğal kaynakların paylaşımı için birbirleriyle sürekli mücadele ve etkileşim halinde olmak durumunda kaldığı görülmektedir. Su kaynaklarının azalması ülkeler arasındaki ilişkiyi olumsuz yönde etkileyecek niteliktedir. Günümüzde petrol için yapılan mücadelelerin ve savaşların gelecekte su için yapılacağı öngörülmektedir (Mbonile, 2005). Tarıma dayalı ekonomi özellikle Türkiye'nin de dahil olduğu Ortadoğu bölgesinde çok büyük öneme sahiptir.

Bu bölgede doğacak bir su kıtlığı tüm dünyayı ekonomik açıdan olumsuz etkileyecektir. Ayrıca, suya sahip olan ülkeler beynelmilel gücü de elinde bulunduracağından su yoksunu ülkeler ile arasında barışın sağlanması da güçleşecek, dünyada bir 'su gücü' eşitsizliği doğacaktır (Özsoy, 2009). Bu açıdan su kaynaklarının etkin kullanımı ile su ve atıksu geri kazanım teknolojilerinin en verimli şekilde kullanılması, gelecekte güçlü ülkeler arasında yer almak için hayati öneme sahip bir konular olacaktır.

Türkiye, hidrolojik açıdan 25 farklı akarsu havzasına ayrılmıştır (Şekil 6). Bu havzalardan 5 tanesi (Çoruh, Meriç-Ergene, Dicle-Fırat, Asi ve Aras Havzaları) sınıraşan su havzası özelliği göstermektedir. Yıllık havza ortalaması bazında, Dicle-Fırat 52,94 milyar $m^3$, Çoruh 6,3 milyar $m^3$, Aras 4,63 milyar $m^3$ ve Asi 1,17 milyar $m^3$ olmak üzere toplamda 66,37 milyar $m^3$ su iletmektedirler (DSİ, 2010). Türkiye'deki toplam 25 havzanın ortalama yıllık akış değeri 186,86 milyar $m^3$ olup, toplam su miktarının %35,5'ini oluşturmaktadır. Verilen değerlerden de anlaşılacağı üzere yıllık akım miktarları göz önüne alındığında Türkiye'de sınıraşan sular oldukça önem taşımaktadır.




***Şekil 6.*** *Türkiye akarsu havza haritası (Yılmaz, 2015).*

Sınıraşan akarsulardan Fırat, Dicle, Aras ve Çoruh nehirlerinde Türkiye, yukarı kıyıdaş yani memba ülke konumunda iken Meriç Nehri'nde aşağı kıyıdaş yani mansap ülke durumundadır. Bulgaristan'da Rodop Dağları'ndan doğan Meriç Nehri'ne, Bulgaristan'dan doğan Tunca ve Arda Nehirleri ile Türkiye'den doğan Ergene Nehri dökülmektedir. Edirne'nin batısından Türkiye'ye ulaşan Meriç Nehri, Yunanistan ile sınırı çizerek Enez'den Ege Denizi'ne ulaşmaktadır. Diğer yandan Türkiye, Asi Nehri ile büyük oranda aşağı kıyıdaş /mansap ülke konumunda bulunmaktadır (Şekil 7).




***Şekil 7.*** *Ortadoğu'da sınır aşan suları gösteren su haritası (International Monetary Fund, 2001)*

## 5. Su Temin Yöntemleri

Yüzey suyu ve yeraltı suyu, su temini ihtiyaçları için önemli kaynaklardır. Yeraltı suyu, müstakil evler ve küçük kasabalar için ortak bir kaynak olup, nehirler ve göller büyük şehirler için olağan kaynaklardır. Tatlı suyun yaklaşık %98'i yeraltı suyu olarak mevcut olmasına rağmen, çoğu çok derinlerde bulunmaktadır. Bu durum pompalamayı çok pahalı hale getirir ve tüm yeraltı suyu kaynaklarının tam olarak gelişmesini ve kullanılmasını engeller.

### 5.1. Yüzey Su Kaynakları

Bir nehir veya göle yüzey akışına katkıda bulunan toplam arazi alanına havza, drenaj havzası veya toplama alanı denir. Belediye arzı için mevcut su hacmi, çoğunlukla yağış miktarına bağlıdır. Aynı zamanda havzanın büyüklüğüne, zeminin eğimine, toprak ve bitki örtüsü tipine ve arazi kullanım tipine de bağlıdır.

Bir nehrin akış hızı veya deşarjı zamana göre değişiklik gösterir. Daha yüksek akış hızları tipik olarak ilkbaharda meydana gelirken kış aylarında daha düşük akış hızları meydana gelir. Ancak muson sistemleri olan bölgelerde genellikle durum böyle değildir. Bir nehrin ortalama deşarjı güvenilir bir su temini için yeterli olmadığında, bir koruma rezervuarı inşa edilebilir. Su akışı bir baraj tarafından engellenerek yapay bir gölün oluşmasına izin verilir. Koruma rezervuarları, kuraklık ve düşük akarsu akışı zamanlarında kullanılmak üzere yağışlı hava dönemlerinden gelen suyu depolar. Rezervuar içinde, çeşitli derinliklerde giriş delikleri ve vanaları olan bir su alma yapısı inşa edilmiştir. Bir rezervuardaki suyun kalitesi mevsimsel olarak derinliğe göre değişiklik gösterdiğinden, çok seviyeli bir giriş, en iyi kalitede suyun çekilmesini mümkün kılar. Bazen ekonomik nedenlerle çok amaçlı bir rezervuar sağlanması tavsiye edilir.

Çok amaçlı bir rezervuar, topluluk su ihtiyaçlarının bir kombinasyonunu karşılamak için tasarlanmıştır. İçme suyuna ek olarak, rezervuar taşkın kontrolü, hidroelektrik güç ve rekreasyon da sağlayabilir (Nathanson, 2020).

### 5.2. Yeraltı Su Kaynakları

Yeraltı suyu kaynağı olarak bir akiferin değeri, oluştuğu jeolojik tabakanın veya katmanın gözenekliliğinin bir fonksiyonudur. Su, bir kuyudan veya sızma galerisinden pompalanarak akiferden çekilir. Bir sızma galerisi tipik olarak geniş çaplı bir dikey şaftın altından dışarıya doğru yayılan birkaç yatay delikli boru içerir. Kuyular, akiferin derinliğine ve doğasına bağlı olarak çeşitli şekillerde inşa edilir. Genel su temini için kullanılan, genellikle 30 metreden (100 fit) daha derin ve 10 ila 30 cm (4 ila 12 inç) çapındaki kuyular, güvenilir kaliteli su temini sağlayabilen büyük akiferlere nüfuz etmelidir.

Darbeli veya döner teknikler kullanılarak delinirler ve kirlenmeyi önlemek için genellikle metal bir boru veya kasa ile kaplanırlar. Muhafazanın üst kısmının dışındaki halka şeklindeki boşluk, çimento harcı ile doldurulur ve daha fazla koruma sağlamak için üste özel bir sıhhi conta takılır. Muhafazanın alt kısmında, silt ve kumu yeraltı suyundan uzaklaştırmak için oluklu bir elek takılıdır. Suyu yüzeye çıkarmak için bir elektrik motoru tarafından tahrik edilen bir dalgıç pompa kullanılabilir. Bazen derin bir kuyu, sınırlı bir artezyen akiferine nüfuz edebilir, bu durumda doğal hidrostatik basınç suyu yüzeye çıkarabilir (Nathanson, 2020).

### 5.3. Alternatif Su Temin Yöntemleri

Küresel ölçekte su kıtlığının artmasına bağlı olarak alternatif su temini yöntemleri de önem kazanmaktadır. Su kıtlığı, esasında sosyo-ekonomik, teknolojik ve çevresel etkenlere bağlıdır. Sosyo-ekonomik faktörlere nüfus artışı örnek verilebilirken, teknolojik etkiler güvenilir teknolojilerin uygulanmasını belirlemekte ve maliyet belirlenerek teknoloji seçimi yapmayı belirtmektedir. Günümüzdeki su kıtlığının başlıca sebeplerinden birisi yanlış teknolojilerin uygulanmasıdır. Bu sebeple su temininde günümüzde alternatif teknoloji arayışına girilmiştir. Alternatif su temini yöntemlerinin başında yağmur suyu hasadı, su geri kazanımı ve desalinasyon teknikleri gelmektedir (Köseoğlu-İmer vd., 2018). Küresel ısınmaya ve insan etkisine bağlı olarak temiz su kaynaklarının azalması günümüzde su çevrimine ek olarak arıtma teknolojileriyle suyun yeniden kullanımını zorunlu hale getirmiştir (Şekil 8).




***Şekil 8.*** *Alternatif yöntemlerin su çevriminde uygulanması*

Su geri kazanımı ile kaynakların sürdürülebilir olması sağlanarak enerji ve kaynakların daha verimli kullanımı sağlanabilmektedir. Atıksu geri kazanımı, yeterli su temini yapılamayan bölgelerde atıksuyun arıtılarak geri kazanılmasını içermektedir. Bu noktada atıksu önemli bir su kaynağı haline gelmiştir. Özellikle tarım ve endüstride kullanılan geri kazanılmış su miktarı önemli ölçüde artmıştır. Tarımda atıksuyun kullanılması 5.000 yıl öncesine dayanmaktadır. Daha yakın zamanlarda, 19. yüzyılda, yüzey sularına deşarj için büyük ölçekli atıksu taşıma sistemlerinin icat edilmesiyle, kanalizasyon ve diğer atıkların uygun olmayan bir şekilde içme suyu temininde dolaylı kullanımına yol açmıştır.

Bu planlanmamış yeniden kullanım yöntemi yetersiz içme suyu ve atıksu arıtma teknolojileri ile birleşince, 1840 ve 1850'li yıllarda ortaya kolera ve tifüs gibi suya bağlı hastalıklar ortaya çıkmıştır. Bu tür hastalıkların sudan kaynaklandığı kesinleşince, atıksu arıtımı ve su temini teknolojilerine mühendislik yaklaşımıyla bakılmaya başlanmıştır. Örneğin; alternatif su kaynaklarına yönelinmiş, bu bağlamda rezervuar ve su kemeri sistemleri kullanılmıştır. En önemli atılımlardan birisi de 1850 ve 1860'lı yıllarda su arıtımında filtrasyonun kullanılmaya başlanmasıdır (Asano vd., 1996). 1900'lü yıllara gelindiğinde ise su/atıksu geri kullanımı Amerika Birleşik Devletleri'nde birçok eyalette teşvik edilmiş, Avrupa Birliği'nde ise "Avrupa Toplulukları Komisyonu Yönergesi" olarak hayata geçirilmiştir.

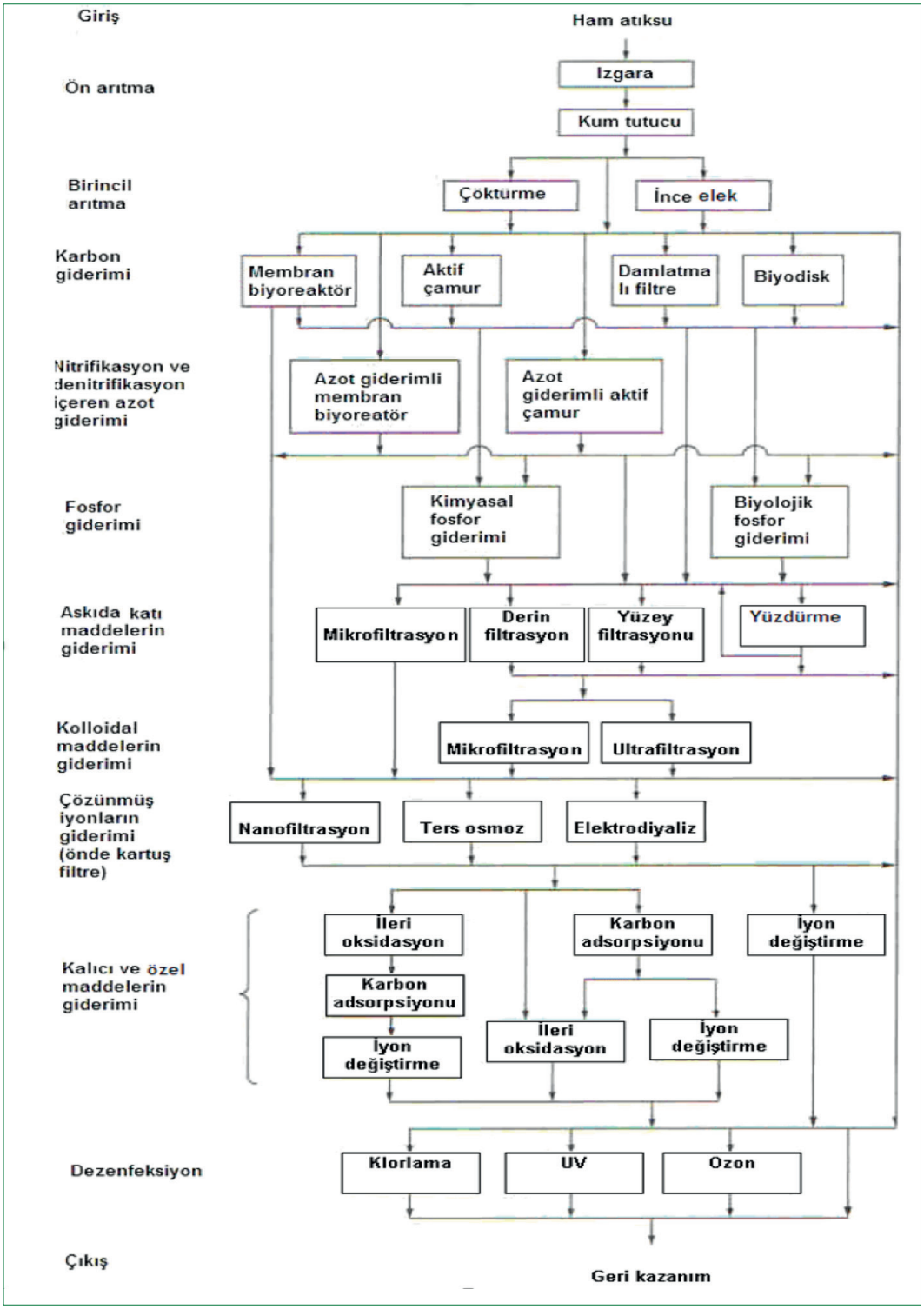
### 5.4. Su/Atıksu Geri Kazanım Yöntemleri

Su geri kazanımı, özellikle kurak ortamlarda çeşitli amaçlar için dünya genelinde giderek artan bir şekilde uygulanmaktadır. Bu nedenle, atıksu arıtma ve geri kazanım metodolojilerinin geleceğini değerlendirmeye yönelik girişimlerde bulunulmuştur (Gupta ve Ali, 2013). İklim değişikliği ile ilgili son zamanlardaki endişeler ve doğal kaynakların sınırlı mevcudiyeti ile atıksudan daha fazla su ve enerji geri kazanımına yönelik güçlü ihtiyaçlar nedeniyle, daha sürdürülebilir atıksu arıtma çözümleri aranmaktadır. Şekil 9 'da atıksu arıtımında en yaygın kullanılan teknolojiler gösterilmiştir. Enerji fiyatlarındaki belirsizlik ve ulusal düzeydeki itici güçler, atıksu arıtma tesislerinin düşük enerji alternatiflerine doğru değiştirilmesini gerektirmektedir.

### 5.5. Atıksu Geri Kazanımında Membran Teknolojileri

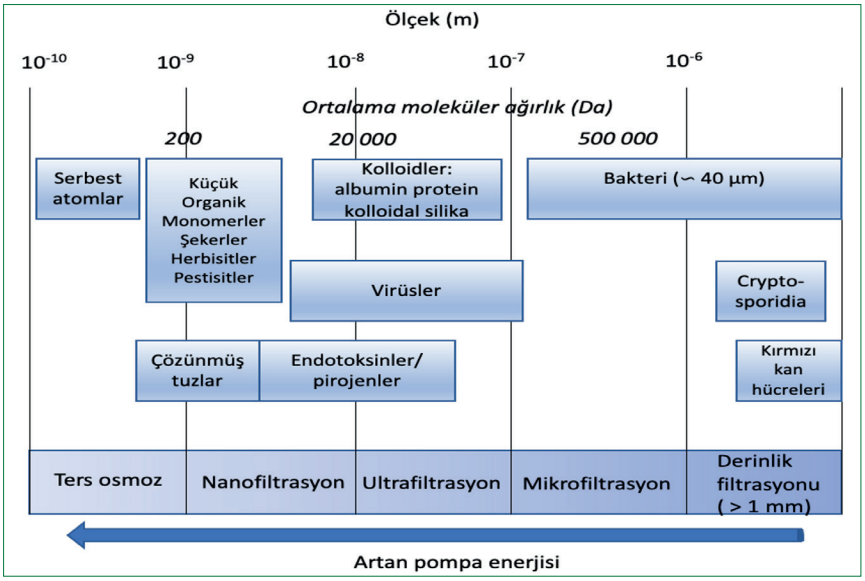
Atıksulardan su geri kazanımı evsel ve endüstriyel atıksularda farklı teknolojiler ile yapılabilmektedir. Bu noktada evsel atıksulardan su geri kazanımında patojen mikroorganizmalar ile mikrokirleticilerin sudan uzaklaştırılması önem arz ederken endüstriyel atıksuların geri kazanımında kanserojen organik maddeler ile ağır metallerin giderimi büyük öneme sahiptir. Son yıllarda arıtılması gereken su ve atıksu miktarlarının artması nedeniyle çok daha az yer ihtiyacı olan, farklı niteliklerdeki atıksulara uygulanabilen, düşük maliyetli ve yüksek verimli arıtma teknolojileri üzerine çalışmalar ve uygulamalar artırılmıştır. Atıksu arıtımında ve geri kazanımında kullanılacak teknolojinin seçiminde öncelikli etken geri kazanılacak suyun hangi amaçla ve hangi kalitede olacağıdır. Artımın hangi seviyede yapılacağına ve buna bağlı olarak kullanılacak olan teknolojiye, kimyasallara, tüketilecek enerji ve personel ihtiyacına karar verirken bu faktör göz önüne alınmaktadır. Nihai karar verilen teknolojiyi atıksuyun kalitesi ve miktarı, eser elementlerin var olup olmadığı ve zamanla değişimi etkilemektedir (MEMTEK Bülteni, 2016).

Alternatif su temininde membran teknolojiler son yıllarda hayli önemli hale gelmiş, özellikle tarım ve endüstride kullanılmak üzere su temininde membran uygulamalarının sayısı hızla artış göstermiştir. Atıksu arıtımında ve desalinasyonda kullanılan membran çeşitlerine, ters osmoz (TO), nanofiltrasyon (NF), ultrafiltrasyon (UF), mikrofiltrasyon (MF) ve membran biyoreaktör




***Şekil 9.*** *Atıksu geri kazanımında kullanılan proses akım şemaları (Metcalf ve Eddy, 2006)*

(MBR) örnek verilebilir (Taşdemir ve Koyuncu, 2021). Membranların kullanım alanlarından bazıları içme suyu arıtımı, evsel ve endüstriyel atıksu arıtımı, gaz ayrımı, deniz suyundan içme suyu eldesi, biyogaz üretimi ve bakteri/virüs ayrımıdır. Membran ayırma proseslerinin gözenek boyutlarına göre ayrım şablonu Şekil 10'da verilmiştir.




***Şekil 10.*** *Membran ayırma proseslerine genel bakış (Judd ve Jefferson, 2003)*

Membranlar iki faz arasındaki seçici geçirgen bariyerlerdir. Membranlar özellikle çıkış suyu kalitesinden, az yer kaplamalarından, otomasyon ile işletilebilmelerinden ve kimyasal ihtiyacını düşürmelerinden dolayı daha çevreci özellikleriyle de diğer yöntemlere göre üstünlük sağlamaktadırlar. Ancak membranların tıkanma problemlerinden dolayı performansları olumsuz etkilenebilmektedir. Su ve atıksu arıtımının her geçen gün daha da önemli hale gelmesiyle membranların performans kısıtlayıcı özelliklerinin iyileştirilerek daha yüksek giderim ve geri kazanım verimi elde edilmesi gerekmektedir.

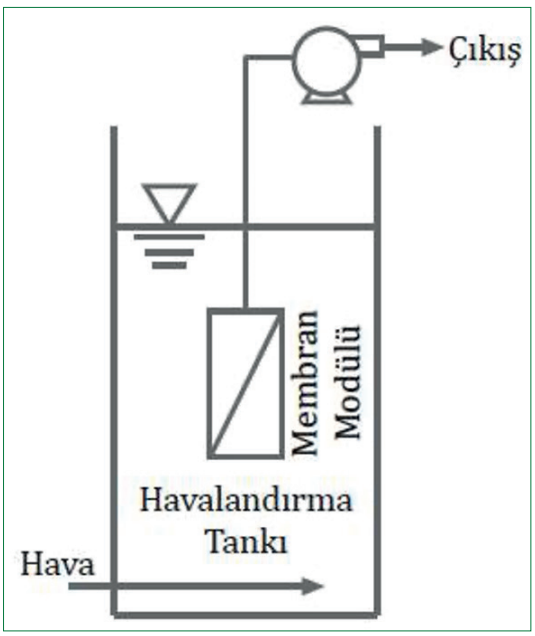
Membran teknolojileri atıksu geri kazanımında kullanılan en üstün teknolojiler arasındadır. MF, UF, NF ve TO sistemleri mevcut arıtım teknolojilerine ilave olarak uygulanan teknolojilerdir. MF ve UF membranları ile işletilebilen MBR prosesi ise biyolojik atıksu arıtımı ve geri kazanımında uygulanabilen sistemlerdir. Atıksu geri kazanımında doğrudan veya dolaylı olmak üzere iki farklı metot uygulanmaktadır.

Doğrudan geri kazanımda su direkt olarak endüstriyel ya da ziraai amaç için kullanılabilmektedir. Endüstriyel ya da ziraai amaçla yapılacak geri kazanım uygulamalarında atıksu arıtma prosesi, arıtılan atıksuyun kullanım amacına göre seçilmektedir. Dolaylı geri kazanımda ise arıtılmış atıksular yüzeysel sularda ya da yeraltı suyu rezervuarlarında depolanarak ve mevcut su kaynaklarına karıştırılarak kullanılmaktadır.

MBR sistemleri, "batık" ve "harici" sistem olarak iki farklı grupta sınıflandırılmaktadırlar. Bu iki grup arasındaki farklılıklar işletme koşullarından ve tasarım adımlarından ileri gelmektedir.

### 5.6. Batık MBR Sistemleri

İşletme ve yatırım maliyetlerini azaltabilmek için aktif çamur tankı içerisine daldırılan membranların uygulama şekline batık membran filtrasyonu adı verilmektedir. Süzüntü, membranlardan vakum pompası yardımıyla çekilerek alınmaktadır. Düşük basınçlı işletim yüzeydeki kek tabakasının oluşumunu minimize etmekte ve TMP adı verilen "Membran Geçiş Basıncı" 50-300 mbar arasında tutularak kontrol edilmektedir. Membrandaki süzüntü (permeyt) akısı genellikle 10-50 L/$m^2$.sa arasında değişmektedir. Membranların tıkanmasını engellemek ve sabit performansla işletebilmek amacıyla hava ile sıyırma işlemi uygulanmaktadır. Batık membran filtrasyonunda havalandırma için gerekli enerji harici sistemler ile kıyaslandığında arıtılan birim su hacmi başına 1/10'u seviyelerindedir (Koyuncu vd., 2018). (Şekil 11)

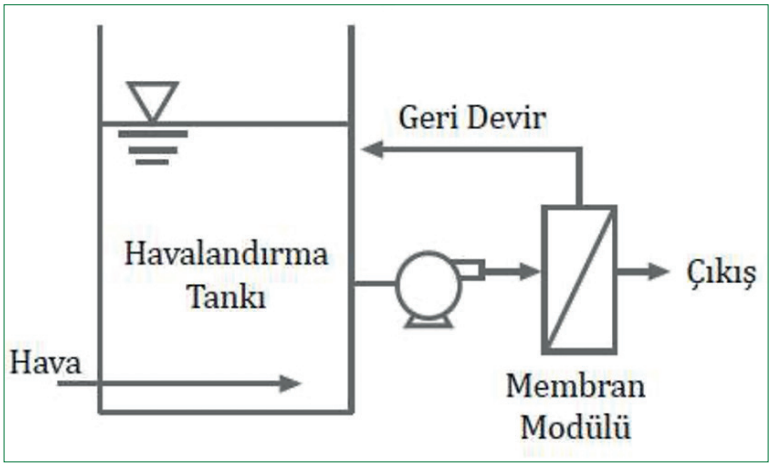



***Şekil 11.*** *Batık MBR sistemlerinin şematik gösterimi (Koyuncu vd., 2018)*

### 5.7. Harici MBR Sistemleri

Harici membran sistemleri genellikle düz plaka ve tübüler olarak batık membran sistemleri ticarileşene kadar biyolojik tank dışında kullanılacak şekilde tasarlanmışlardır. Membran modülleri havalandırma tankının (aktif çamur tankı) dışında bulunmakta ve pompa yardımı ile basınç kullanılarak filtrasyon işlemi sağlanmaktadır. Harici MBR sistemleri batık MBR sistemlerine göre işletimi daha kolay olup ayrıca daha yüksek akılar elde edilebilmektedir (Şekil

12). Öte yandan, batık MBR sistemlerine göre nispeten daha yüksek (3-6 bar) işletim basınç değerlerinden dolayı ihtiyaç duyulan basınç kapları ve membranları, üretim maliyetlerini çok yükseltmektedir. Ayrıca, konsantre akımının tekrar sistemin başına geri devrettirilmesi ile atıksu arıtımında ilave organik yük ve bunun sonucunda daha yüksek maliyet ortaya çıkarmaktadır. Bunun nedeni, arıtılacak suyun %5'i membrandan geçebilirken %95'lik kalan kısmın geri devredilmesidir. Sonuç olarak suyun tamamını arıtmak için 20 kat daha fazla geri devir yapmak gerekmektedir (Koyuncu vd., 2018).




***Şekil 12.*** *Harici MBR sistemlerinin şematik gösterimi (Koyuncu vd., 2018)*

Özellikle son yıllarda atıksu arıtımında göstermiş olduğu avantajlardan dolayı MBR tesislerinin kurulumu dünya çapında artış göstermiştir. Tablo 4'te Dünyada kurulu en büyük MBR tesislerinden örnekler verilmiştir.

***Tablo 4.*** *Dünyada Kurulu En Büyük MBR Tesisleri (The MBR Site, 2018)*

| **Proje Adı** | **Yer** | **İnşa Tarihi** | **Kapasite (1000 $m^3$/gün)** | **Notlar** |
|---|---|---|---|---|
| Tuas Water Reclamation Plant | Singapur | 2025 | 800 | - |
| Himmerfjärdsverket | Stockholm, İsveç | 2024/2025 | 158 | 8 °C tasarım sıcaklığı/ 312 MLD debiyi destekleme seçeneği ortaya çıkmaktadır. |
| Big Creek WRF | Fulton Country, GA, ABD | 2024 | 120 | - |
| WWTP in Fuijan Province | Fuijan, Çin | 2020 | 80 | - |
| Beihu WWTP | Hubei, Çin | 2019 | 800 | - |
| Changi Train 5 | Changi, Singapur | 2019 | 108 | - |

***Tablo 4(devamı).*** *Dünyada Kurulu En Büyük MBR Tesisleri (The MBR Site, 2018)*

| **Proje Adı** | **Yer** | **İnşa Tarihi** | **Kapasite (1000 m³/gün)** | **Notlar** |
|---|---|---|---|---|
| Shek Wui He | Hong Kong | 2019 | 40 | Devreye alınmaktadır. |
| Henriksdal | İsveç | 1. Kademe 2019<br>2. Kademe 2021<br>3. Kademe 2023<br>4. Kademe 2026 | 536 | - |
| Euclid | Ohio, ABD | 2018 | 83 | - |
| Cleveland Bay | Townsville, QLD, Avustralya | 2018 | 32 | Tesis büyütülmüş ve teknoloji değiştirilmiştir. |
| Al Ansab | Muscat, Umman | 2018 | 96 | - |
| Jilin WWTP (Phase 2) | Jilin, Çin | 2017 | 180 | - |
| Brussels Sud | Brussels, Belçika | 2017 | 86 | - |
| Huaifang Water Recycling Project | Beijing, Çin | 2016 | 600 | Evsel/Kentsel Atıksu |
| Chengdu Xingrong Project (Plant 4) | Chengdu, Çin | 2016 | 150 | Evsel/Kentsel Atıksu |
| Hwaseong-Dongtan STP | Hwaseong City, Gyeonggi, Güney Kore | 2016 | 122 | - |
| Shunyi | Beijing, Çin | 2016 | 180 | - |
| Water Affairs Integrative Project | Xingyi, Guizhou, Çin | 2016-2017 | 307 | - |
| Seine Aval | Achere, Fransa | 2016 | 224 | - |
| Jiaxin Project | Jiaxin, Çin | 2016 | 150 | Evsel/Kentsel Atıksu |
| Canton WWTP | Ohio, ABD | 2015-2017 | 159 | - |
| 9th & 10th WWTP | Kunming, Yunnan, Çin | 2013 | 250 | - |
| Gaoyang Textile Ind. Park WWTP Phase 1&2&3 | Gaoyang, Çin | 2016 | 260 | Tekstil/Boya/Pigment/ Boyama |
| Wuhan Sanjintan WWTP | Hubei, Çin | 2015 | 200 | - |
| Chengdu Xingrong Project (Plant 8) | Chengdu, Çin | 2016 | 200 | Evsel/Kentsel Atıksu |
| Weibei Ind. Park Wanzi WWTP | Xi'an, Çin | 2016 | 200 | - |
| Nanyang High-tech Zone Optoelectronics Ind. Park WWTP | Henan, Çin | 2016 | 140 | - |

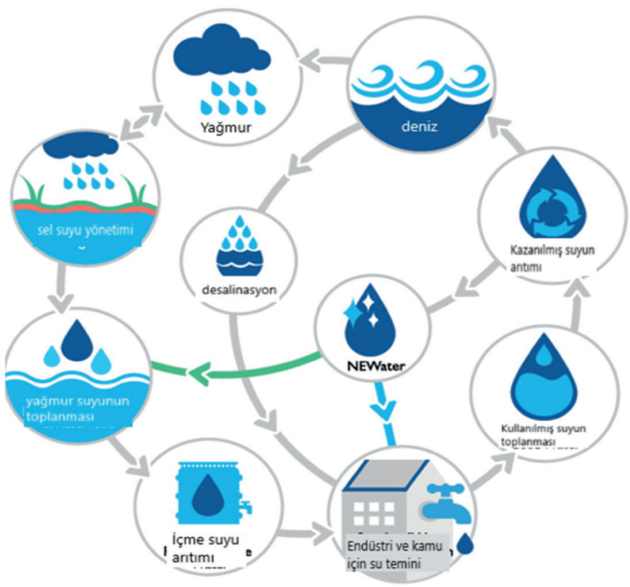
**Tablo 4 (devamı).** *Dünyada Kurulu En Büyük MBR Tesisleri (The MBR Site, 2018)*

| Proje Adı | Yer | İnşa Tarihi | Kapasite (1000 $m^3$/gün) | Notlar |
|---|---|---|---|---|
| Zhangzhou dongdun WWTP Phase 1 | Fuijan, Çin | 2016 | 130 | - |
| Huhehaote Zhanggaiying WWTP | İç Moğolistan, Çin | 2016 | 120 | - |
| ZhuHai Qianshan WWTP | Guangdong, Çin | 2016 | 100 | - |
| Assago | Milan, İtalya | | | |
| Chengdu Xingrong Project (Plant 3) | Chengdu, Çin | 2016 | 200 | Evsel/Kentsel Atıksu |
| Chengdu Xingrong Project (Plant 5) | Chengdu, Çin | 2016 | 200 | Evsel/Kentsel Atıksu |
| Wuhan Sanjintan WWTP | Hubei, Çin | 2015 | 200 | - |
| Xianlin WWTP PPP Project | Nanjing, Jiangsu, Çin | 2015 | 100 | - |
| Jinyang WWTP (Phase 1) | Shanxi, Çin | 2015 | 120 | - |
| Jilin WWTP (Phase 1, Yenileme) | Jilin, Çin | 2015 | 200 | - |
| Santa Guistina | Rimini, İtalya | 2015 | 76 | Gerçek tasarım akısı: 54.8-76 MLD |
| Caotan WWTP PPP Project | Xi'an, Shanxi, Çin | 2015-2017 | 200 | - |
| Cox Creek WRF | Maryland, ABD | 2015 | 58 | - |
| Songsan Green City | Kore | 2015 | 84 | - |
| Liaoyang City Centre WWTP Phase 2 | Liaoyang, Çin | 2014 | 200 | Evsel/Kentsel Atıksu |
| Nanjing East WWTP (Phase 3) | Jiangsu, Çin | 2014 | 150 | - |
| Riverside | California, ABD | 2014 | 124 | - |
| Changsa 2nd WWTP | Hunan, Çin | 2014 | 140 | - |
| Visalia | California, ABD | 2014 | 85 | - |
| Yantai TaoziWan WWTP (Phase 2) | Shandong, Çin | 2014 | 150 | - |
| Hebei Zhengding WWTP | Hebei, Çin | 2014 | 100 | - |

| Proje Adı | Yer | İnşa Tarihi | Kapasite (1000 $m^3$/gün) | Notlar |
|---|---|---|---|---|
| Ballanger McKinney ENR WWTP | Maryland, ABD | 2013 | 58 | - |
| Aquaviva | Cannes, Fransa | 2013 | 60 | - |
| Beijiao WWTP renovation project | Ordos, İç Moğolistan | 2013 | 100 | - |
| Daxing Huangcun WRP | Beijing, Çin | 2012 | 120 | - |
| Busan City | Korea | 2012 | 102 | - |
| Qinghe WRP (Phase 2) | Beijing, Çin | 2011 | 150 | - |
| Brightwater | Washington, ABD | 2011 | 122 | - |
| Yellow River | Georgia, ABD | 2011 | 71 | - |
| North Las Vegas | Nevada, ABD | 2011 | 97 | - |
| Awaza/Polimeks | Türkmenistan | 2011 | 71 | - |
| Guangzhou Jingxi Underground MBR Project | Guangzhou, Çin | 2010 | 130 | Evsel/Kentsel Atıksu |
| Wenyuhe River Water Treatment (Phase 2) | Beijing, Çin | 2010 | 100 | - |
| Guangzhou | Çin | 2010 | 100 | - |
| Sambo (aka Sanpou) STP | Sakai, Japonya | 2010 | 59,7 | - |
| Shiyan Shendinghe | Çin | 2009 | 110 | - |
| Changi | Singapur | 2009 | 61 | - |

### 5.8. Su Geri Kazanımının Sektörel Uygulamaları

Membran teknolojileri esaslı atıksu geri kazanımı uygulamaları Avustralya, Kuveyt, Singapur, Amerika Birleşik Devletleri, Çin, Japonya, Belçika vb. ülkelerde uygulanmaktadır. Singapur örneği ele alındığında $km^2$ başına düşen kişi sayısının çok yoğun olduğu ve sınırlı su kaynakları nedeniyle günlük 1,82 milyon $m^3$'lük suyunun Malezya'dan karşıladığı görülmektedir. Singapur suyu iki farklı yöntemle yeniden kullanmaktadır. Geri kazanılmış suyun bir kısmı endüstriyel proseslerde tekrar kullanılırken diğer kısmı ise daha ileri arıtma teknikleri kullanılarak içme suyu olarak sağlanmaktadır. 2003 yılında tamamlanan 72.000 $m^3$/gün kapasiteye sahip NeWater projesi sayesinde çıkış suyu kalitesi EPA ve WHO standartlarını sağlayacak şekilde atıksu arıtımı yapılabilmektedir (Taşdemir ve Koyuncu, 2021) (Şekil 13).

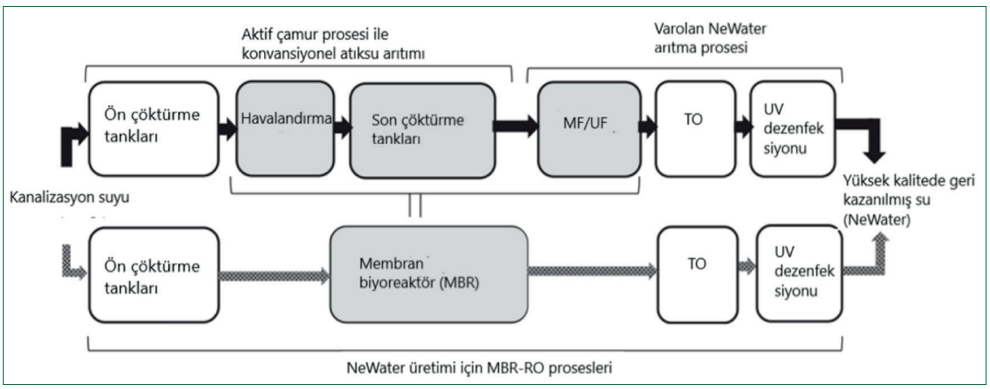



**Şekil 13.** *Singapur su çevrimi (PUB 2, 2017)*

Geri kazanılan su, doğrudan ve dolaylı olarak farklı endüstrilerinde kullanım alanı bulmaktadır. Dolaylı kullanıma örnek olarak silikon plaka üretimi, enerji, petrokimya tesislerinde ve soğutma kulelerinde proses suyu verilebilirken, doğrudan kullanımda arıtılan atıksular yağmur suyu kanallarıyla içme suyu tesislerine alınabilmekte ya da rezervuarda depolanabilmektedir.

NeWater prosesinde kullanılan arıtma sistemi genel olarak iki ayrı akım üzerinden işletilmektedir (Şekil 14). İlk akımın 1. aşamasında atıksular konvansiyonel tekniklerle arıtıldıktan sonra askıda katı maddeler (AKM), kolloidal partiküller ve patojenlerin giderimi için MF/UF membranlarından geçirilmektedir. Daha sonra suda bulunan bakteri-virüs-protozoalar, sülfat, nitrat, ağır metaller ve organik bileşiklerin uzaklaştırılması için TO membranlarına gönderilmektedir. TO ile arıtılan suyun içme suyu olarak kullanılabilmesi için ultraviyole (UV) dezenfeksiyon kullanılmaktadır. İkinci akımda ise konvansiyonel aktif çamur prosesi

yerine MBR teknolojisi kullanılmaktadır. Arıtılan atıksu ilk akımda olduğu gibi sırasıyla TO ve UV dezenfeksiyon proseslerine gönderilmektedir. 2016 yılı itibariyle, NeWater arıtma tesisi Singapur'un su talebinin %40'ını karşılamakta olup, önümüzdeki on yıl içerisinde su arzının %50'ye artması hedeflenmektedir (PUB, 2017; Köseoğlu-İmer vd., 2018; Taşdemir ve Koyuncu, 2021).

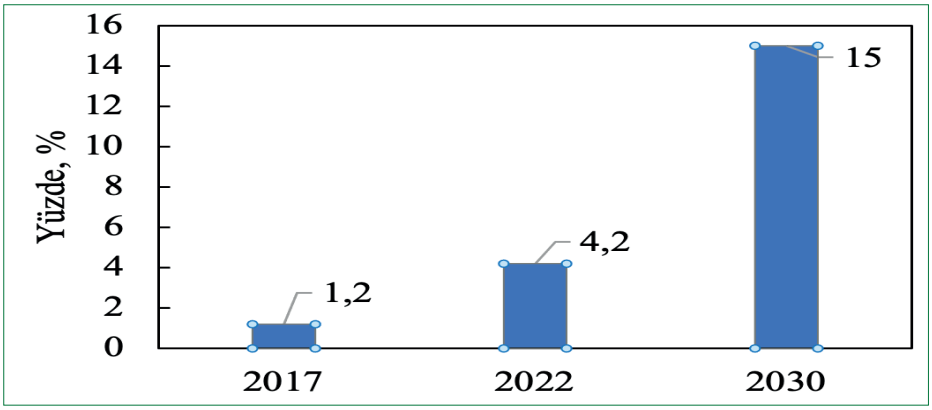



***Şekil 14.*** *NeWater arıtma teknolojileri (Lee ve Tan, 2016)*

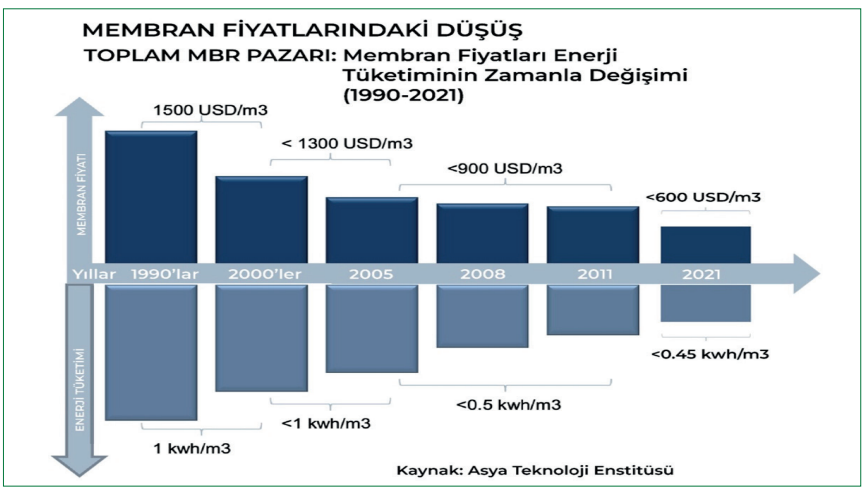
Türkiye için, atıksu arıtma tesislerinin hiçbirinin başlangıçta yeniden kullanım için inşa edilmediği açıktır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Türkiye, 2008 – 2012 yılı için önceden hazırlanmış bir eylem planına dayalı olarak 2015 – 2023 yıllarını hedef alan bir atıksu arıtımı Eylem Planı hazırlamıştır. Türkiye nehir havzalarındaki su kalitesi ve miktarının değerlendirilmesi için, eylem planında modelleme teknikleri ile kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam fosfor (TP), amonyum azotu ($NH_4$-N), nitrat azotu ($NO_3$-N), organik ve inorganik kirletici düzeyi gibi bazı önemli parametreler üzerinde durulmuştur.

1990'lı yıllarda konvansiyonel aktif çamur prosesi yaygın iken, 2000'li yıllara gelindiğinde nütrient (azot ve fosfor) arıtımı için ileri biyolojik atıksu arıtma tesisleri yaygınlaşmaya başlamıştır. Ülkemizde yaygın bir şekilde uygulaması bulunan atıksu arıtma prosesleri, ön arıtma, mekanik (birincil) arıtma, biyolojik (ikincil) ve kaba ızgara, pompa istasyonları, ince elek, kum ve yağ giderme, ön çökeltim tankları, havalandırma tankları ve son çökeltim tankları (aktif çamur sistemi) dahil olmak üzere ileri arıtmadır. Kentsel atıksuların toplanması ve ardından arıtılmış olarak (uygulanan standartlara göre) uygun bertaraf yöntemleri ile alıcı ortama deşarj edilmesi, belediyelerin yükümlülüğündedir. Ancak, son yıllarda Muğla, Antalya Gazipaşa, Konacık belediyesi AAT ve İSKİ Ağva AAT'inde olduğu gibi bazı durumlarda konvansiyonel arıtma prosesleri yerine membran prosesleri (MBR) ve dezenfeksiyon ünitesi kullanımı da değerlendirilmektedir (Maryam ve Büyükgüngör, 2019).

Şekil 15'te Türkiye'deki mevcut su geri kazanım oranı verilmiştir. Buna göre 2022 yılı itibari ile atıksuların %4,2'si geri kullanılmaktadır. 2030 yılında bu değerin %15'e çıkması beklenmektedir. Membran fiyatlarında ve işletme maliyetlerindeki azalma devam etmektedir. Şekil 16'da bu azalmanın değişimi gösterilmiştir. Membran maliyetlerinin azalması ile birlikte, su geri kazanımı projeleri daha da önem kazanmakta ve uygulama sayıları artmaktadır.




***Şekil 15.*** *Türkiye'de su geri kazanım oranı ve 2030 yılı tahmini değeri (Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2022)*

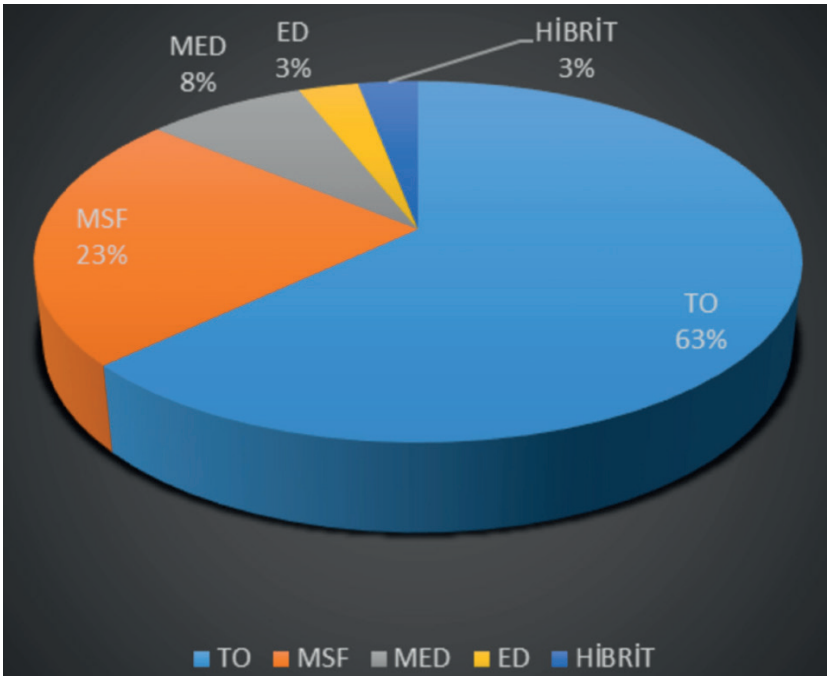



***Şekil 16.*** *Membran fiyatlarında ve işletme maliyetlerinde yıllara göre azalma (Frost & Sullivan, 2022)*

### 5.9. Desalinasyon

Termal ve membran prosesler, en yaygın şekilde kullanılan tuzlu su arıtma teknolojileridir. Deniz suyundan temiz suyun buharlaştırılarak arındırılması için evaporatör ve kondenser sistemi termal proseslere dahil edilirken, deniz suyundan çözünmüş tuzların arıtılması ve membran proseslerle içme suyu elde edilmesi için mekanik veya kimyasal/elektriksel yöntemler kullanılabilmektedir. Solar distilasyon (SD), çok aşamalı distilasyon (MVC) ve çok etkili buharlaştırma/distilasyon (MED), termal tuzdan arındırma işlemleridir. Elektrodiyaliz ve ters osmoz işlemleri, deniz suyu tuzdan arındırma (desalinasyon) teknolojilerine örnektir. Ayrıca son zamanlarda termal prosesleri membran prosesler ile birleştiren hibrit sistemler kullanılmaktadır. Daha yaygın uygulama alanları, "membran distilasyonu (MD) ve TO" ile "MED ve destekli MSF" işlemlerini içerir (Gude 2016; MEM-TEK Bülteni, 2017).

Yıllar içerisinde desalinasyon teknolojilerinde kullanılan yöntemler farklılık göstermiştir. 2000 yılından sonra inşa edilen desalinasyon tesislerinin ~%70'ini membran desalinasyon teknolojileri oluşturmaktadır. Örneğin, 2005 yılında bu tesislerin %60'ı termal yöntemleri, %40'ı ise membran teknolojileri kullanılmakta iken, günümüzde mevcut tesislerim %60'ı membran teknolojileri ve diğer termal ve hibrit teknolojileri kullanmaktadır. Şekil 17 incelendiğinde son yıllarda desalinasyon endüstrisinde kullanılan teknolojilerin %63'ünün TO, %23'ünün MSF ve %8'inin MED prosesinden oluştuğu ve kalan kısmın ise elektrodiyaliz ve diğer hibrit prosesleri içerdiği görülmektedir (Gude, 2016; MEM-TEK Bülteni, 2017). Tablo 5'te membran teknolojisi kullanan dünyanın en büyük desalinasyon tesisleri verilmiştir.




***Şekil 17.*** *Desalinasyon teknolojileri (MEMTEK Bülteni, 2017).*

## 6. Sonuç ve Öneriler

İçilebilir su kaynaklarının her geçen gün azaldığı yeryüzünde mevcut su kaynaklarının muhafaza edilmesi, alternatif ve yeni su kaynaklarının temin edilebilmesi amacıyla membran proseslerin kullanımının önemi her geçen gün artmaktadır. Bu çalışmada, küresel iklim değişikliğinin oluşturmuş olduğu ve yakın gelecekte çok daha derin bir şekilde hissedilecek olan su kıtlığı durumunda, alternatif su temini için desalinasyon ve su geri kazanımı amacıyla kullanılan membran teknolojileri ele alınmıştır. Membran maliyetlerinin azalması ile birlikte, hem membran proseslerine dayanan su geri kazanımı projeleri hem de desalinasyon projeleri daha da önem kazanmakta ve uygulama sayıları artmaktadır. Bu bağlamda membran teknolojilerin yerli olarak üretimi ve kullanımının yaygınlaştırılması ülkemizin su kaynaklarının korunması açısından büyük önem arz etmektedir.

***Tablo 5.*** *Dünya çapında membran teknolojisi kullanılan en büyük desalinasyon tesisleri*

| Tesis | Kapasite ($m^3$/gün) | Ülke | Teknoloji | Devreye Alınma Tarihi | Kaynak |
|---|---|---|---|---|---|
| Ashkelon | 396.000 | İsrail | Ters Osmoz | 2005 | (MEMTEK Bülteni, 2017) |
| Tampa Bay | 114.000 | ABD | Ters Osmoz | 2008 | (MEMTEK Bülteni, 2017) |
| Palmachim | 274.000 | İsrail | Ters Osmoz | 2008 | (GES, t.y.) |
| Hadera | 525.000 | İsrail | Ters Osmoz | 2009 | (MEMTEK Bülteni, 2017) |
| Beckton | 150.000 | İngiltere | Ters Osmoz | 2010 | |
| Fujairah 2 | 591.000 | BAE | Ters Osmoz +Distilasyon | 2010 | |
| Beni Saf | 200.000 | Cezayir | Ters Osmoz | 2010 | |
| Chennai | 100.000 | Hindistan | Ters Osmoz | 2010 | |
| Torrevieja | 240.000 | İspanya | Ters Osmoz | 2011 | |
| Adelaide | 300.000 | Avustralya | Ters Osmoz | 2012 | |
| Victoria Desalination | 450.000 | Avustralya | Ters Osmoz | 2012 | |
| Limassol | 40.000 | Güney Kıbrıs | Ters Osmoz | 2010 | (Republic of Cyprus Ministry of Agriculture, Rural Development and Environment, 2017) |
| Sorek | 624.000 | İsrail | Ters Osmoz | 2013 | (MEMTEK Bülteni, 2017) |
| Point Lisas | 110.000 | Trinidad | Ters Osmoz | 2013 | |
| Az Zour | 136.000 | Kuveyt | Suudi Arabistan | 2014 | |
| Ras al-Khair | 1.036.000 | Suudi Arabistan | Ters Osmoz +Distilasyon | 2015 | |
| Tenes | 200.000 | Cezayir | Ters Osmoz | 2015 | (Smart Water Magazine, 2015) |
| Claude "Bud" Lewis Carlsbad | 190.000 | ABD | Ters Osmoz | 2015 | (MEMTEK Bülteni, 2017) |
| Melbeurne | 450.000 | Avustralya | Ters Osmoz | 2015 | (de Albornoz Portes, 2017) |
| Tua Spring | 318.500 | Singapur | Ters Osmoz | 2015 | (MEMTEK Bülteni, 2017) |
| Jebel Ali | 637.000 | BAE | Ters Osmoz | 2018 | |
| Ras abu fontas a3 | 164.000 | Katar | Ters Osmoz | 2018 | |
| Shuqaiq 3 | 450.000 | Suudi Arabistan | Ters Osmoz | 2018 | (Almar Water Solutions, 2020) |
| Rabigh 3 | 600.000 | Suudi Arabistan | Ters Osmoz | 2021 | (Acwa Power (a), 2023) |
| Taweelah | 909.000 | BAE | Ters Osmoz | 2023 | (Acwa Power (b) 2023) |

## 7. Kaynaklar / References

Acwa Power (a), (2023), Son Erişim Tarihi: 04.04.2023 https://acwapower.com/en/projects/rabigh-3-iwp/

Acwa Power (b), (2023), Son Erişim Tarihi: 04.04.2023 https://acwapower.com/en/projects/al-taweelah-iwp/

Almar Water Solutions, (2020), Son Erişim Tarihi: 04.04.2023: https://almarwater.com/pf/shuqaiq-3/

Aquastat, (2018), WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), The United Nations World Water Development Report 2018, Son Erişim Tarihi: 04.04.2023 http://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018/

Asano, T., Levine, A.D. (1996). Wastewater reclamation, recycling and reuse: past, present ve future. Water Science and Technology, 33, (10-11), 1-14.

Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, *Atık Su Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği Revizyonu (2022), 25.10.2022,* https://csb.gov.tr/cevre-sehircilik-ve-iklim-degisikligi-bakanligi-atik-su-aritma-tesisleri-teknik-usuller-tebligi-revizyonu-bakanlik-faaliyetleri-36271.

Damkjaer, S.,Taylor, R. (2017). The measurement of water scarcity: Defining a meaningful indicator. Ambio, 46(5), 513–531. https://doi.org/10.1007/s13280-017-0912-z.

de Albornoz Portes, F. J. C. (2017). Alliances: An Innovative Management Model for Public and Private Investments. In B. L. Moya, M. o. S. de Gracia, & L. F. Mazadiego (Eds.), Case Study of Innovative Projects- Successful Real Cases. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.68228.

DSİ, (2015), Son Erişim Tarihi: 04.04.2023 https://docplayer.biz.tr/10353333-Turkiye-nin-su-potansiyelinin-belirlenmesi-calismalari.html

DSİ, (2010), Su kaynakları, Son Erişim Tarihi: 04.04.2023, https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/754

DSİ, (2006), Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü 2006 Yılı Faaliyet Raporu.

Falkenmark M., Lundqvist J., Widstrand C. (1989). Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: aspects of vulnerability in semi-arid development. Nat. Resour. Forum, 13 (4), 258-267, 10.1111/j.1477-8947.1989.tb00348.x.

Frost & Sullivan (2022), Global Membrane Bioreactor (MBR) Market – Soaring Demand in Developing Markets Fuels Growth Momentum.

GES, (t.y.), Son Erişim Tarihi: 04.04.2023, https://ges.co.il/project/palmachim-swro/

Gude V.G. (2016). Desalination and Sustainability – An Appraisal and Current Perspective, Water Research, 89, 87-106.

Gupta V.K., Ali, I. (2013) Environmental Water: Advances in Treatment, Remediation and Recycling, Elsevier, UK.

Günay, G. (2011). Türkiye'nin yüzey suları ve yeraltı suları potansiyeli. Bilim Aklın Aydınlığında Eğitim, 132, 56-60.

International Monetary Fund, (2001), Son Erişim Tarihi: 04.04.2023: https://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/2001/09/fisher.htm

Judd S. & Jefferson B. (2003) Membranes for Industrial Wastewater Recovery and Re-use, UK.

Koyuncu İ. (2016). Su ve Güç: Türkiye'nin Su Potansiyeli, Sultangazi Belediyesi.

Koyuncu İ., Türken T., Köseoğlu-İmer D. (2018). Bölüm 9. Aerobik Membran Biyoreaktör. Su Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Cilt 2.

Köseoğlu-İmer D., Güçlü S., Koyuncu İ. (2018). Bölüm 14. Evsel Atıksuların Membran Teknolojileri ile Geri Kazanımı. Su Atıksu Arıtılması ve Geri Kazanılmasında Membran Teknolojileri ve Uygulamaları, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Cilt 2.

Lee H., Tan. TP. (2016). Singapore's experience with reclaimed water: NEWater, International Journal of Water Resources Development, 32 (4), 611-621, DOI: 10.1080/07900627.2015.1120188.

Maryam, B., Büyükgüngör, H. (2019) Wastewater reclamation and reuse trends in Türkiye: Opportunities and challenges. Journal of Water Process Engineering 30, 100501.

Mbonile, M. J. (2005). Migration and intensification of water conflicts in the Pangani Basin, Tanzania. Habitat international, 29(1), 41-67.

MEMTEK Bülteni, (2016). Atıksu Geri Kazanımı, 1 (2), ISSN: 2564-6176.

MEMTEK Bülteni, (2017). Desalinasyon, 2 (3), ISSN: 2564-6176.

Metcalf & Eddy, (2006). Water Reuse: Issues, Technologies and Applications, McGraw Hill, New York.

Nathanson, J. A., (2020), Water supply system. Encyclopedia Britannica, Son Erişim Tarihi: 04.04.2023, https://www.britannica.com/technology/water-supply-system

Özsoy, S. (2009). Su ve Yaşam: Suyun Toplumsal Önemi. Yüksek Lisans Tezi, T.C. Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Çalışma Ekonomisi ve Endüstri İlişkileri Anabilim Dalı, Ankara.

PUB 2 (2017) (Son Erişim Tarihi: 5.11.2022). https://www.pub.gov.sg/PublishingImages/PUB_Waterloop.png

Republic of Cyprus Ministry of Agriculture, Rural Development and Environment, 2017, Son Erişim Tarihi: 04.04.2023 http://www.moa.gov.cy/moa/wdd/wdd.nsf/page23_en/page23_en?opendocument

Sarış, F. (2021). Türkiye'de Evsel Su Tedarik ve Tüketim İstatistiklerinin Değerlendirilmesi, Coğrafi Bilimler Dergisi 19(1), 195-216.

Smart Water Magazine, (2015), Son Erişim Tarihi: 04.04.2023: https://smartwatermagazine.com/news/abengoa/algerias-tenes-desalination-plant-built-abengoa-produces-200-million-m3-drinking-water

Taşdemir, R. Ş., ve Koyuncu, İ. (2021) Membran Teknolojileri ile Alternatif Su Temini: Desalinasyon ve Atıksu Geri Kazanımı. Sürdürülebilir Çevre Dergisi, 1(1), 18-30.

The MBR Site, (2018), Son Erişim Tarihi: 04.04.2023, https://www.thembrsite.com/largest-mbr-plants/largest-membrane-bioreactor-plants-worldwide/

TSKB, (2019), Türkiye Sınai Kalkınma Bankası A.Ş., TSKN Tematik Bakış Su: Yeni Elmas.

TÜİK, (2022). Dünya Nüfus Günü, 06.07.2022, Sayı 45552.

TÜSİAD, (2008). Türkiye Sanayi ve İşadamları Derneği, Türkiye'de Su Yönetimi: Sorunlar ve Öneriler, Eylül, TÜSİAD Yayın No: T/2008-09/469, İstanbul.

Tzanakakis, V.A., Paranychianakis, N., Angelakis, A. (2020). Water supply and water scarcity. Water, 12 (2347), 1-16. doi:10.3390/w12092347

United Nations (2018) Sustainable Development Goal 6: Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation. New York, Son Erişim Tarihi: 04.04.2023 www.unwater.org/app/uploads/2018/07/SDG6_SR2018_web_v5.pdf.

Usta, A. (2016). Türkiye'nin Su Potansiyelinin Belirlenmesi Üzerine Bir Araştırma, Küresel Mühendislik Çalışmaları Dergisi 3(2), 1-9.

Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., van Vliet, M. T. H., Yillia, P., Ringler, C., Burek, P., and Wiberg, D. (2016). Modeling global water use for the 21st century: the Water Futures and Solutions (WFaS) initiative and its approaches, Geosci. Model Dev., 9, 175–222, https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016.

WWAP (UNESCO World Water Assessment Programme) (2019).,The United Nations World Water Development Report 2019: Paris, France. Leaving No One Behind. Paris, UNESCO

Yılmaz, M. (2015). "Orta Doğu'da Su Sorunu Kapsamında Türkiye'nin Sınıraşan Sularının Jeopolitik Önemi", http://tucaum.ankara.edu.tr/wp-content/uploads/sites/280/2015/08/ semp6_36.pdf, erişim:22.05.2019.

Yılmaz, M. L. & Peker, H. S. (2013). Su Kaynaklarının Türkiye Açısından Ekono-Politik Önemi Ekseninde Olası Bir Tehlike: Su Savaşları. Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, 3 (1), 57-74 .

## Yazarlar Hakkında / About Authors

**Prof. Dr. İsmail KOYUNCU | TÜBA Asli Üyesi | İstanbul Teknik Üniversitesi | koyuncu[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0001-8354-1889**

1974 yılında doğdu ve 1990 yılında Antalya lisesinden mezun oldu. İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde lisans (1995), yüksek lisans (1997) ve doktora (2001) eğitimlerini tamamladı. Doktora sonrası araştırmalarda bulunmak üzere 2002 yılında bir yıl süre ABD'de Rice University Civil and Environmental Engineering Department'da, 2003 yılında iki ay süre Belçika'da University of Leuven ve tekrar, 2004 yılında ABD'de Rice University'de bir yıl süre ile misafir profesör olarak bilimsel araştırma ve incelemelerde bulundu ve birçok projede görev aldı. 1996 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak başladığı akademik hayatını, 2009 yılından beri Profesör olarak aynı bölümde devam ettirmektedir. 2012-2018 yılları arasında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü, İTÜ Yönetim Kurulu ve Senatosu üyesi olarak görev yapmıştır. Şu anda, İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörü ve Ulusal Membran Teknolojileri (MEMTEK) Araştırma Merkezi Müdürü olarak görev yapmaktadır. Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) Asil üyesidir. 2008 yılında TÜBİTAK teşvik ödülü ve 2009 yılında ise Çevre alanında ECO ödülü almıştır. Birçok dergide yayın kurulu üyesidir. Ulusal ve uluslararası birçok konferans düzenlemiş ve bilim kurulunda bulunmuştur. Araştırma konuları, su ve atıksu arıtımı ve geri kazanımı, ileri su arıtım teknolojileri, deniz suyu arıtım teknolojileri, membran teknolojileri, membrana dayanan su filtresi geliştirilmesi, çevre nanoteknolojisi, altyapı planlama ve tasarım esasları ve arıtma tesislerinin hidroliğidir. 150'nin üzerinde uluslararası dergilerde makale ve 200'den fazla uluslararası sempozyumlarda sunumu bulunmaktadır. Evli ve 3 çocuk babasıdır.

**Prof. Dr. İsmail KOYUNCU | TÜBA Full Member | Istanbul Technical University | koyuncu[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0001-8354-1889**

He was born in 1974 and graduated from Antalya high school in 1990. He had a B.Sc., M.S. and Ph.D degrees in Environmental Engineering Environmental Engineering Department of Istanbul Technical University, in 1995, 1997 and 2002, respectively. He has completed a-year-post doctorate studies at Rice University, USA in 2003 and 2-months-post doctorate studies in Belgium. He also worked as a visiting professor at Rice University for one year in 2004. He worked as a Research Assistant in Istanbul Technical University between 1996-2004 and is currently working as a Professor in Environmental Engineering Department of Istanbul Technical University. He worked as a Dean of graduate school, Senate and Board Member of Istanbul Technical University between 2012-2018. Now, he is the president of Istanbul Technical University and Director of National Research Center on Membrane Technologies. He is also member of Turkish Academy of Sciences since 2012. He was awarded with The Scientific and Technological Research Council of Türkiye (TUBITAK) Young Scientist Award (2008) and Economic Cooperation Organization (ECO) International Award 2009 (in the field of Environment). Research areas are water and wastewater treatment and reuse, adwanced water treatment technologies, membrane technologies, environmental nanotechnology, environmental effects of nanoparticles, hydraulics of water and wastewater treatment plants. He has more than 150 journal papers and 200 conference presentations. He is married with 3 children.

**Dr. Mehmet Emin PAŞAOĞLU | İstanbul Teknik Üniversitesi |**
**mpasaoglu[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0003-1152-8823**

1989 yılında Ereğli/Zonguldak'ta doğdu. Selçuk Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini 2011 yılında tamamladıktan sonra Ulusal Membran Teknolojileri UYG-AR Merkezi (MEMTEK) araştırmacı olarak kariyerine başladı. Yüksek Lisans ve Doktora programını İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programında tamamladı. Atıksu arıtımı, membran filtre üretimi, ileri osmoz ve basınç geciktirmeli osmoz, ters osmoz sistemleri üzerine uzmanlaştı. Birçok ulusal ve uluslararası araştırma projesinde araştırmacı olarak bulundu ve çok sayıda uluslararası makalesi mevcuttur. Yürütücülüğünü yaptığı TÜBİTAK 1001 projesini 2022 yılı içerisinde başlamış olup, başarıyla devam etmektedir. Yüksek Lisans ve doktora döneminde İTÜ Çevre Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak akademik çalışmalarını sürdürdü. Hali hazırda Dr. Öğr. Üyesi ünvanı ile İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümünde çalışmalarını sürdürmektedir. Evli ve 1 çocuk babasıdır.

**Dr. Mehmet Emin PAŞAOĞLU | Istanbul Technical University |**
**mpasaoglu[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0003-1152-8823**

He was born in 1989 in Ereğli/Zonguldak. After completing his undergraduate education at Selçuk University, Department of Environmental Engineering in 2011, he started his career as a researcher at the National Membrane Technologies UYG-AR Center (MEMTEK). He completed his Master's and Doctorate programs at Istanbul Technical University Environmental Sciences and Engineering Program. Specialized in wastewater treatment, membrane filter production, advanced osmosis and pressure retarded osmosis, reverse osmosis systems. He has been a researcher in many national and international research projects and has many international articles. The TÜBİTAK 1001 project, which he directed, started in 2022 and continues successfully. He continued his academic studies as a Research Assistant in the Department of Environmental Engineering at ITU during his master's and doctorate periods. Currently Dr. Instructor As a member, he continues his studies at ITU Environmental Engineering Department. He is married with 1 child.

**Dr. Türker TÜRKEN | İstanbul Teknik Üniversitesi |**
**turken[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0003-0550-5975**

1987 yılında Elazığ'da doğdu. Fırat Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini 2009 yılında tamamladıktan sonra Ulusal Membran Teknolojileri UYG-AR Merkezi (MEMTEK) kurulumunda araştırmacı olarak kariyerine başladı. Yüksek Lisans ve Doktora programını İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programında tamamladı. Atıksu arıtımı, membran filtre üretimi, membran biyorektör sistemlerinin tasarımı, ters osmoz sistemleri üzerine uzmanlaştı. Birçok ulusal ve uluslararası araştırma projesinde araştırmacı olarak bulundu. Yürütücülüğünü yaptığı TÜBİTAK 1001 projesini 2022 yılı içerisinde başarıyla tamamladı. Yüksek Lisans ve doktora döneminde İTÜ Çevre Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak akademik çalışmalarını sürdürdü. Hali hazırda Dr. Öğr. Üyesi ünvanı ile İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümünde çalışmalarını sürdürmektedir. Evli ve 2 çocuk babasıdır.

**Dr. Türker TÜRKEN | Istanbul Technical University |**
**turken[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0003-0550-5975**

He was born in 1987 in Elazığ. After completing his undergraduate education at Fırat University Environmental Engineering Department in 2009, he started his career as a researcher at the establishment of the National Membrane Technologies UYG-AR Center (MEMTEK). He completed his Master's and Doctorate programs at Istanbul Technical University Environmental Sciences and Engineering Program. He specialized in wastewater treatment, membrane filter production, membrane biorector systems design, reverse osmosis systems. She has been a researcher in many national and international research projects. He successfully completed the TÜBİTAK 1001 project, which he directed, in 2022. He continued his academic studies as a Research Assistant in the Department of Environmental Engineering at ITU during his master's and doctorate periods. He is currently working as an Assistant Professor at ITU Environmental Engineering Department. He is married with 2 children.

**Dr. Ayşe YÜKSEKDAĞ | İstanbul Teknik Üniversitesi |**
**yuksekdaga[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0002-7751-7556**
1987 yılında İstanbul'da doğdu. Yıldız Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimini 2011 yılında tamamladıktan sonra 2014 yılında Ulusal Membran Teknolojileri UYG-AR Merkezi (MEMTEK) kurulumunda araştırmacı olarak kariyerine başladı. Yüksek Lisans programını Gebze Teknik Üniversitesi Çevre Mühendisliği, Doktora programını ise İstanbul Teknik Üniversitesi Çevre Bilimleri ve Mühendisliği Programında tamamladı. Atık ve atıksulardan ürün geri kazanımı, atıksu arıtımı, membran filtre üretimi, ileri osmoz, ters osmoz, membran solvent ekstraksiyonu sistemleri üzerine uzmanlaştı. Birçok ulusal araştırma projesinde araştırmacı olarak bulundu. Yüksek Lisans ve doktora döneminde İTÜ Çevre Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak akademik çalışmalarını sürdürdü. Hali hazırda Dr. Öğr. Üyesi ünvanı ile İTÜ Çevre Mühendisliği Bölümünde çalışmalarını sürdürmektedir

**Dr. Ayse YÜKSEKDAĞ | Istanbul Technical University**
**yuksekdaga[at]itu.edu.tr | ORCID: 0000-0002-7751-7556**
She was born in 1987 in İstanbul. After completing his undergraduate education at Yıldız Technical University Environmental Engineering Department in 2011, she started his career as a researcher at the establishment of the National Membrane Technologies UYG-AR Center (MEMTEK) in 2014. She completed her Master's program in Gebze Technical University Environmental Engineering and Doctorate program at Istanbul Technical University Environmental Sciences and Engineering. She specialized in product recovery from waste and wastewater, wastewater treatment, membrane filter production, forward osmosis, reverse osmosis and membrane solvent extraction systems. She has been a researcher in many national research projects. She continued her academic studies as a Research Assistant in the Department of Environmental Engineering at ITU during her master's and doctorate periods. She is currently working as an Assistant Professor at ITU Environmental Engineering Department.

# GERİ KAZANILAN KENT ATIKSULARININ SULAMADA KULLANIMI VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ

# USE OF RECLAIMED URBAN WASTEWATER IN IRRIGATION AND APPLICATION EXAMPLES

*Mehmet Emin AYDIN*
*Senar AYDIN*

 DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch11

# GERİ KAZANILAN KENT ATIKSULARININ SULAMADA KULLANIMI VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ

***Mehmet Emin AYDIN***
*Necmettin Erbakan Üniversitesi*

***Senar AYDIN***
*Necmettin Erbakan Üniversitesi*

**Özet**

Su kaynaklarının sınırlı olması, iklim değişimi etkisi, nüfus artışı ve kişi başına artan su tüketimi özellikle kurak ve yarı kurak bölgelerde ve gelişmekte olan ülkelerde önemli bir sorundur. Mevcut su kaynaklarının sürdürülebilir olmayan yönetimi ve antropolojik etkiler sebebiyle kirlenmesi bu sorunu büyütmektedir. UNESCO (2006) Dünya Su Raporunun mevcut tüketim alışkanlıklarıyla ilgili öngörülerine göre, kötümser durumda içinde bulunduğumuz yüzyılın ortalarına kadar 60 ülkede yaklaşık 7 milyar insan su kıtlığı yaşayacak; iyimser durumda 48 ülkede en az 2 milyar insan su sıkıntısı çekmek zorunda kalacaktır. Ayrıca IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) (2007) raporuna göre dünyada iklim değişikliğinin etkileri sebebiyle küresel su kıtlığının daha da ağırlaşacağı tahmin edilmektedir. Bu durumda su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için suyun yeniden kullanımı bir gereklilik haline gelmektedir. Tarımsal sulama dünya çapında su ihtiyacının en büyük kısmını oluşturmaktadır. Geri kazanılmış atıksuların tarımsal sulama için yeniden kullanılması, tatlı su kaynaklarının korunması için özellikle büyük bir potansiyeldir. Gelişmekte olan birçok ülkede, arıtılmamış veya yetersiz arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımı çok yaygındır. Özellikle arıtılmamış kent atıksuları ücretsiz olarak temin edilebildiği, kurak dönemlerden bağımsız olduğu ve gübre olarak yüksek bir değere sahip olduğu için sulama suyu olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, yeniden kullanılması için atıksuyun arıtılması, arıtma teknolojisine ilişkin ulusal düzenlemelerin yapılarak standartlar getirilmesi, ülkeye özgü farklı kısıtlamaların göz önünde bulundurulması gereklidir. Sürdürülebilir su kaynakları yönetimi için atıksuyun bir kaynak olarak kabul edilmesi esastır. Ancak kontrolsüz yeniden kullanımla bağlantılı insan sağlığına ve çevreye olan riskleri en aza indirmek için ilgili arıtma süreçleri ve uygulamaların izlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, suyun yeniden kullanımı, Türkiye'nin su potansiyeli ve kullanımı, atıksuların tarım ve peyzaj alanlarının sulanmasında kullanımı, ülkemizde atıksuların yeniden kullanımı ile ilgili mevzuat, Konya kapalı havzası ve su kaynakları ile ilgili bilgiler verilmiştir. Geri kazanılmış atıksuyun sulamada kullanımı Konya ve Braunschweig-Almanya uygulama örnekleri ile değerlendirilmiştir.

***Anahtar kelimeler***
*Kent atıksuları, Yeniden kullanım, Tarımsal sulama.*

# USE OF RECLAIMED URBAN WASTEWATER IN IRRIGATION AND APPLICATION EXAMPLES

***Mehmet Emin AYDIN***
*Necmettin Erbakan University*

***Senar AYDIN***
*Necmettin Erbakan University*

**Abstract**

Urban wastewater disposal, agricultural water demand, limited water resources, climatic constraints, population growth and increasing water consumption per capita are important problems especially in arid and semi-arid regions and developing countries. Unsustainable management of existing water resources and pollution due to anthropological effects exacerbate this problem. According to the predictions of the UNESCO (2006) World Water Report on current consumption habits, according to the most negative estimate, approximately 7 billion people in 60 countries will experience water scarcity by the middle of this century; in the best case, at least 2 billion people in 48 countries will have to suffer from water shortages. In addition, according to the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) report, it is estimated that global water scarcity will worsen due to the effects of climate change in the world. Therefore, reuse of water is essential for the sustainable management of water resources. Agricultural irrigation accounts for the largest portion of water needs worldwide. The reuse of recovered wastewater for agricultural irrigation has a particularly great potential for the conservation of freshwater resources. In many developing countries, the reuse of untreated or insufficiently treated wastewater is very common. In particular, urban raw wastewater is used for irrigation as it is freely available and independent of dry periods and has a high value as a fertilizer. However, in order to reuse water, it is necessary to treat wastewater, to set standards by making national regulations on treatment technology, and to consider different country-specific restrictions. For sustainable water resources management, it is essential to accept wastewater as a resource. However, in order to minimize human health and environmental risks associated with uncontrolled reuse, relevant treatment processes and monitoring of practices should be implemented. In this study, information about the reuse of water, Türkiye's water potential and use, the use of wastewater for agricultural irrigation and landscaping purposes, the legal regulations regarding the reuse of wastewater in our country, Konya closed basin and water resources are presented. The use of reclaimed wastewater in irrigation has been evaluated with the application examples of Konya and Braunschweig, Germany.

***Keywords***
*Urban wastewater, Reuse, Agricultural irrigation.*

## 1. Giriş

Nüfus artışı, yükselen yaşam standartları, kentleşme, artan ekonomik faaliyetler ve sulu tarım alanlarının genişlemesi nedeniyle suya olan talep her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle su taleplerinin yönetimi ve yeni su kaynaklarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Su sınırlı bir kaynak olduğu için sadece bir kez kullanımı uygun değildir. Suyun etkin ve verimli kullanılması, geri kazanılarak yeniden kullanımı su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltacaktır. Tablo 1'de suyun yeniden kullanım kategorileri ve tipik uygulamaları verilmiştir. Geri kazanılan atıksular kent, endüstri, kısmen tarım su ihtiyaçları, rekreasyon, habitat restorasyonu, yeraltı suyu beslemesi gibi farklı şekillerde kullanılabilir (Asano vd., 2007).

***Tablo 1.*** *Suyun yeniden kullanım kategorileri ve tipik uygulamaları (Asano vd., 2007)*

| **Kategori** | **Tipik uygulamalar** |
|---|---|
| Tarım alanları sulaması | Ürün sulaması, ticari fidanlıklar |
| Peyzaj sulaması | Parklar, okul bahçeleri, otoyol refüjleri, golf sahaları, mezarlıklar, yeşil alanlar |
| Endüstriyel geri kazanım ve yeniden kullanım | Soğutma suyu, kazan besleme suyu, proses suyu, inşaat suyu |
| Yeraltı suyu besleme | Yeraltı suyu takviyesi, tuzlu su girişi kontrolü, çökme kontrolü |
| Rekreasyon/çevre su ihtiyacı kullanımları | Göller ve havuzlar, sulak alan besleme, nehir debisi artırma, balıkçılık, kar yapma |
| Evsel kullanım dışında kentsel kullanımlar | Yangın söndürme, klima suyu, sifon suyu |
| Kullanma suyu | Su kaynaklarını besleme, yeraltı sularına karıştırma |

Atıksuyun her zaman yeterince arıtılmaması, mevcut tatlı su kaynaklarının ve su kalitesinin bozulmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle atıksuların uygun yönetimi, arıtımı ve yeniden kullanımı, özellikle su kıtlığı yaşayan ülkeler için tatlı su kaynaklarının korunması açısından faydalı bir alternatif olarak değerlendirilmelidir. Suyun yeniden kullanımı atıksu içerisindeki azot, fosfor gibi nutrientlerin de yeniden kullanımını sağlar. Bu sebeple tarım alanlarında suyun yeniden kullanımı daha az gübre kullanım avantajı sağlar. Ayrıca çevreye deşarj edilen atıksu miktarının azaltılması hassas sucul ortamların daha iyi korunmasını sağlar. Yeniden kullanım ek su kaynakları ve altyapıya olan ihtiyacı azaltacağından ekonomik avantaj sağlar (Barcelo ve Petrovic, 2011; Al Baz vd., 2008).

Evsel atıksu; evlerden, okullardan, ofislerden, hastanelerden, ticari ve endüstriyel tesislerden kanalizasyon sistemine verilen suların karışımından oluşur. Atıksu miktarı ve kalitesi bölgedeki ticari ve endüstriyel kuruluşların tür ve sayısına, kanalizasyon sistemine girebilecek sızma debisine, kent yağmursuyu debisi gibi kanal ağı toplama yapısına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu nedenle geri kazanılmış kent atıksuları arıtma prosesine bağlı olarak insan sağlığına ve çevreye zararlı olabilecek kimyasal ve biyolojik bileşenler içerebilir. Bunlar askıda katı maddeler, organik maddeler, inorganik maddeler, patojenler, nütrientler, toplam çözünmüş katılar olabilir (Asano vd., 2007).

Suyun yeniden kullanılması için atıksuyun arıtılması gerekir. Su kalitesi ve arıtma teknolojisine ilişkin ulusal ve uluslararası düzenlemelere ve standartlara ek olarak, dikkate alınması gereken ülkeden ülkeye değişen su kullanım türü, mali kaynaklar, mevcut arıtma teknolojileri, yetişmiş kalifiye eleman gibi farklı kısıtlamalar da vardır. Çevre ve insan sağlığını korumak için atıksulardaki hangi kirleticilerin ne kadar arıtılması gerektiği karmaşık bir sorun oluşturur ve her durum için özel çözümlere gereksinim vardır. Atıksu arıtımında uygulanan arıtım kademeleri ön arıtım, birincil arıtım, ileri birincil arıtım, ikincil arıtım, nütrient giderimli ikincil arıtım, üçüncül arıtım ve ileri arıtım olarak sıralanabilir. Ön arıtımda atıksu bileşiminde bulunan yüzebilen iri kum ve gres gibi kaba katı maddelerin giderimi gerçekleştirilir. Bu maddeler arıtma proseslerinde çeşitli işletme problemlerine sebep olabilirler.

Birincil arıtımda atıksudan askıda katı madde ve organik maddenin bir kısmı uzaklaştırılır. İleri birincil arıtımda ise askıda katı ve çökebilir özellikteki organik maddelerin büyük bir kısmı giderilir. Bu aşamada genellikle kimyasal ekleme veya filtrasyon işlemleri sisteme dahil edilir. İkincil arıtım biyolojik olarak parçalanabilen çözünmüş organik maddelerin ve askıda katıların giderimidir. Ayrıca dezenfeksiyon konvansiyonel ikincil arıtım içerisinde yer alabilir. Biyolojik olarak parçalanabilen çözünmüş organiklerin ve askıda katıların giderimi, azot, fosfor veya her ikisinin de giderimi, nütrient giderimli ikincil arıtım olarak nitelendirilir. Üçüncül arıtım da granüler filtre ortamı ya da mikroelekler ile ikincil arıtımdan sonra kalıntı askıda katıların giderilmesi gerçekleştirilir. Dezenfeksiyon ayrıca üçüncül arıtımın bir parçasıdır. Nütrient giderimi de genellikle bu tanımın içerisinde yer alır. Normal biyolojik arıtımdan sonra kalan çözünmüş ve askıda maddelerin uzaklaştırılması için ileri arıtım kullanılır (Tchobanoglous vd., 2004). Atıksuyun içerdiği kirleticiler dikkate alınarak ve hedeflenen yeniden kullanım amacına uygun arıtım işlemleri kullanılmalıdır.

## 2. Türkiye'nin Su Potansiyeli ve Kullanımı

Bir Akdeniz ülkesi olan ülkemizde su mevcudiyeti bölgeden bölgeye büyük farklılıklar göstermekte olup su potansiyeli toplam 234 milyar $m^3$'tür. Toplam yüzeysel su potansiyeli 186 milyar $m^3$'tür. Kullanılabilir su miktarı 98 milyar $m^3$ yüzey suyu, 14 milyar $m^3$ yeraltı suyu olmak üzere toplam 112 milyar $m^3$'tür. Tablo 2'de nüfus başına metreküp su miktarına göre su durum sınırları verilmiştir. Ülkemizde nüfus başına su miktarı yaklaşık 1300 $m^3$ olup su stresi yaşayan ülke durumundadır.

***Tablo 2.*** *Su potansiyeli ve stresi (Falkenmark vd., 1989)*

| **Falkenmark İndeksi ($m^3$/nüfus/yıl)** | **Durum** |
|---|---|
| > 1700 | Su problemi yok |
| 1000-1700 | Su stresi |
| 500-1000 | Su kıtlığı |
| < 500 | Aşırı su kıtlığı |

Türkiye İstatistik Kurumu (TUİK) verilerine göre ülkemizde 2020 yılında 18,2 milyar $m^3$ su çekilmiş olup bunun %56'sı denizlerden, %22,5'i yüzeysel sulardan, %21,5'i ise yeraltı suyundan alınmıştır. Denizlerden çekilen suyun %93,4'ü soğutma amaçlı kullanılmıştır. Alıcı ortama 9,5 milyar $m^3$ soğutma suyu olmak üzere toplam 15,3 milyar $m^3$ atıksu deşarj edilmiştir. Alıcı ortama deşarj edilen atıksuyun %76,6'sı denizlere, %19,3'ü akarsulara, %4'ü ise diğer alıcı ortamlara deşarj edilmiştir. Ülkemizde 2950 belediye mevcut olup, bunlardan 2300 Belediyenin kanalizasyon sistemi bulunmaktadır. Nüfusun yaklaşık %70'ine hizmet eden atıksu arıtma tesisi bulunmaktadır. Belediyeler tarafından ise su kaynaklarından içme ve kullanma suyu şebekelerine 6,5 milyar $m^3$ su çekildiği, bunun %40,9'unun barajlardan, %29,3'ünün kuyulardan, %15,6'sının kaynaklardan, %10,1'inin akarsulardan ve %4'ünün ise göl, gölet veya denizlerden sağlandığı bilinmektedir. Kullanımdan sonra kanalizasyon şebekesi ile toplanan 5 milyar $m^3$ atıksuyun %49,2'si akarsulara, %38,5'i denizlere, %3,1'i barajlara, %1,3'ü göl ve göletlere, %0,4'ü araziye ve %7,5'i diğer alıcı ortamlara deşarj edilmiştir. Deşarj edilen atıksuyun %87,9'u arıtılmıştır. Toplamda 1068 adet arıtma tesisi bulunmakta olup atıksuların %50,7'si ileri arıtım, %27,1'i biyolojik arıtım, %21,9'u fiziksel arıtım ve %0,3'ü ise doğal arıtım metotları ile arıtılmıştır (TUİK, 2021).

Tablo 3'de su tüketiminin sektörel dağılımı verilmiştir. Tablo 3 incelendiğinde 2023 yılında toplam su tüketiminin 112 $km^3$ değerinde olacağı ve bunun %16'sının evsel ihtiyaçlar için, %20'sinin endüstriyel ihtiyaçlar için ve %64'ünün ise sulama suyu olarak kullanılacağı görülmektedir. Sulamada kullanılan su hacminin yıllar içerisinde arttığı dikkat çekmektedir.

***Tablo 3.*** *Su tüketiminin sektörel dağılımı (Aydın ve Kumcu, 2018).*

| Yıllar | Toplam Su Tüketimi | | Sektör | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Sulama | | Evsel | | Endüstriyel | |
| | $km^3$ | % | $km^3$ | % | $km^3$ | % | $km^3$ | % |
| 1990 | 30,6 | 28 | 22,0 | 72 | 5,1 | 17 | 3,4 | 11 |
| 2004 | 40,1 | 36 | 29,6 | 74 | 6,2 | 15 | 4,3 | 11 |
| 2008 | 43,0 | 38 | 32,0 | 74 | 6,0 | 15 | 5,0 | 11 |
| 2014 | 44,0 | 39 | 32,0 | 73 | 7,0 | 16 | 5,0 | 11 |
| 2023 | 112 | 100 | 72,0 | 64 | 18 | 16 | 22 | 20 |

## 3. Atıksuların Tarımsal Sulamada ve Peyzaj Amaçlı Kullanımı

En büyük su tüketicisi olan tarımsal sulama yaklaşık su tüketimin %70'ini oluşturmaktadır. Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin de etkileriyle sulama suyuna olan talep gün geçtikçe artmaktadır. Atıksuyun uygun şekilde yönetimi ve arıtımı sağlanarak tatlı su kaynaklarına değerli bir alternatif oluşturulabilir. Bununla birlikte suyun yeniden kullanımında sağlığa ve çevreye yönelik riskler ve potansiyel zararların değerlendirilmesi gerekir. Arıtılmış atıksuların tarımsal sulamada yeniden kullanılmasının bazı avantajları olduğu gibi bazı dezavantajları da bulunmaktadır.

Atıksuyun tarımsal sulamada kullanımının avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- İlave sulama suyu kaynağının sağlanması,
- Diğer faydalı kullanımlar için su tasarrufunun sağlanması,
- Su ihtiyacının düşük maliyetli kaynağı olması,
- Atıksu bertarafının su kirliliğinin önlenmesinde ekonomik çözümü,
- Sürekli su kaynağı olması, azot ve fosfor gibi bitki besin maddelerinin kullanımı,
- Atıksuyun yeraltı suyuna kazandırılmadan önce ek arıtımının sağlanması.

Atıksuyun tarımsal sulamada kullanımının dezavantajları ise şu şekilde sıralanabilir;

- Uygun şekilde arıtılmayan atıksu halk sağlığı sorunlarına sebep olabilir,
- Yeraltı suyunun kimyasallarla kirletilmesi potansiyeli,
- Atıksudaki çözünebilir bileşiklerin bazılarının bitkiler için toksik etkisi,
- Arıtılmış atıksuyun sulama dağıtım sistemlerini ve topraktaki kılcal gözenekleri tıkayabilecek seviyelerde askıda katı madde içermesi,
- Arıtılmış atıksu yıl boyunca oluşurken, sulama suyu talebinin mevsimsel değişkenliği sebebiyle depolama sorunu,
- Arazi ve donanım için yatırım maliyetleri.

Arıtılmış atıksuyun tarımsal sulamada kullanımı ile ilgili kriterler tanımlanmış ve yönetmelik ve yönergeler ile uygulamaya konulmuştur. Atıksu uygulayan kişilere ve halk sağlığına bakteriyolojik açıdan tehlike oluşturmamalıdır. Arıtılmış suyun tuzluluk değeri bitkilerin ihtiyacı olan suyu alabilmesi için uygun ozmotik basınçları koruyacak kadar düşük olmalıdır. Bor, klorür ve sodyum gibi toplam çözünmüş katı madde içeriğini oluşturan iyonlar ürün için zararlı, sodyum ise toprak için zararlı seviyelerde olmamalıdır. Bazı metallerin ve sentetik organik bileşiklerin miktarları ürün büyümesini olumsuz etkileyecek konsantrasyonlarda olmamalı ve kontrol edilmelidir. Bitkiler için zararlı konsantrasyonlarda olmasa bile molibden, kadmiyum gibi ağır metallerin konsantrasyon değerleri bitkileri yiyecek olan hayvanlar için zehirli olabilecek kadar yüksek olmamalıdır (Barcelo ve Petrovic, 2011; Al Baz vd., 2008).

## 4. Ülkemizde Atıksuların Yeniden Kullanımı

Ülkemizde yerleşim birimlerinden kaynaklanan atıksuların arıtılması ve yeniden kullanımı ile ilgili teknik usul ve uygulamalar Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği (2010) kapsamında düzenlenmiştir. Tebliğin Ek-7'sinde arıtılmış atıksuların sulama suyu olarak geri kullanım kriterleri tanımlanmıştır. Sulamada geri kullanılacak arıtılmış atıksular Sınıf A (ticari olarak işlenmeyen gıda ürünlerinin tarımsal sulaması ve kentsel alanların sulanması) ve

Sınıf B (ticari olarak işlenen gıda ürünlerinin sulanması, girişi kısıtlı sulama alanları ve gıda ürünü olmayan tarımsal sulama) şeklinde sınıflandırılmıştır. Geri kazanılmış suyun kalitesi pH, biyolojik oksijen ihtiyacı ($BOİ_5$), bulanıklık, fekal koliform (bazı durumlarda virüs, protozoa, helmint), bakiye klor parametreleri açısından sınırlandırılmıştır. Sulama suyunun kimyasal kalitesinin değerlendirilmesi için tuzluluk (iletkenlik, toplam çözünmüş madde), geçirgenlik ($SAR_{Tad}$), özgül iyon toksisitesi (sodyum, klorür, bor) açısından sınırlandırılmıştır. Bitkilerin tuzluluğa olan toleransları toplam çözünmüş madde açısından tanımlanmıştır. Değişik bitkilerin sulama suyunda bulunan sodyum tolerans değerleri, bitkilerin yapraklarına zarar veren klorür konsantrasyonları, bitkilerin bora karşı dayanıklılık dereceleri ile ilgili limitler verilmiştir. Ayrıca sulama sularında izin verilebilen maksimum ağır metal ve toksik elementlerin konsantrasyonları belirlenmiştir. Geri kazanılmış evsel atıksularda ikincil arıtma, üçüncül arıtma, ters ozmoz gibi arıtım kademeleri sonucunda atıksuda bulunabilecek eser madde konsantrasyonları verilmiştir. Ham atıksuda ve atıksuyun geri kazanımında kullanılan klasik aktif çamur, biyolojik nütrient giderimi, biyolojik nütrient giderimi+filtrasyon+dezenfeksiyon, membran biyoreaktör, membran biyoreaktör+mikrofiltrasyon+ters ozmoz+dezenfeksiyon arıtım kademeleri için atıksuda olabilecek nütrient (toplam azot, nitrat azotu, toplam fosfor) seviyeleri verilmiştir.

Tablo 4'te ülkemizde atıksu geri kazanım amacı için uygulanabilecek arıtma sistemleri verilmiştir. Tarımsal sulama için klasik aktif çamur sonrası filtrasyon ve klorlama ünitelerinin kullanımı gereklidir.

***Tablo 4.*** *Atıksu geri kazanım amacı için uygulanabilecek arıtma sistemleri*

| **Atıksu geri kazanım amacı** | **Uygulanacak arıtma sistemi** |
|---|---|
| Tarımsal sulama | Klasik aktif çamur + filtrasyon + klorlama |
| Golf sahalarının sulanması | Nitrifikasyon içeren aktif çamur sistemi + kimyasal fosfor giderimi + filtrasyon + klorlama |
| Yeşil alan sulaması | Azot gideren aktif çamur sistemi + mikrofiltrasyon + ultraviyole (UV) |
| Dinlenme maksatlı kullanılan sulak alanları beslemek | Azot ve fosfor giderimini içeren membran biyoreaktör + UV |
| Yeraltı suyuna veya yüzeysel sulara deşarj gibi dolaylı kullanım suyu | Nitrifikasyon içeren aktif çamur sistemi + mikrofiltrasyon + ters ozmoz + UV / (hidrojen peroksit) $H_2O_2$ |
| Endüstriyel soğutma suyu | Azot gideren aktif çamur sistemi + mikrofiltrasyon + UV |
| Endüstriyel proses suyu | Azot gideren aktif çamur sistemi + filtrasyon + nanofiltrasyon + iyon değiştirme + UV |

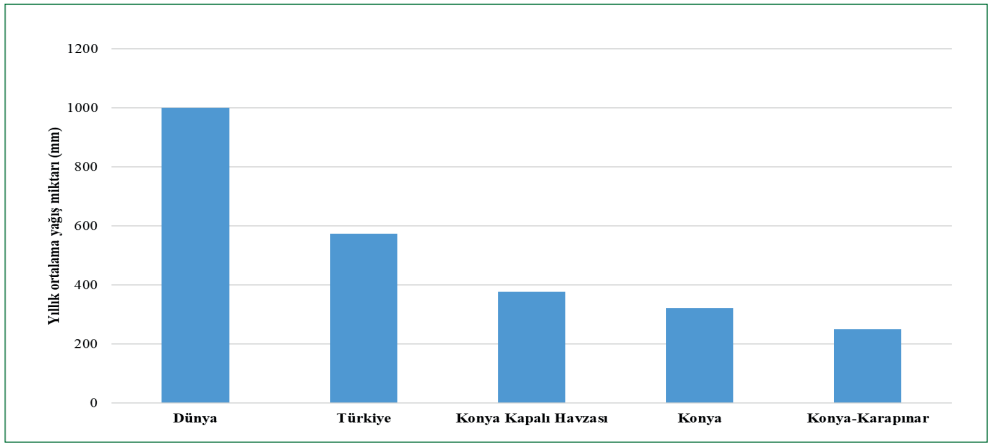
Arıtılmış atıksu ile sulanabilecek bitkiler tarla bitkileri (arpa, mısır, yulaf), lifli ve çekirdekli bitkiler (pamuk), belli bir işlemden sonra tüketilen sebzeler (enginar, şeker pancarı, şeker kamışı), meyve bahçesi ve üzüm bağları (kayısı, portakal, şeftali), fidanlık (çiçek), ormanlık alanlar (kavak vb) için arıtma ihtiyacı ikinci kademe + dezenfeksiyon olarak, ham olarak tüketilen sebzeler (avokado, lahana, salatalık, çilek) içinse ikinci kademe + filtrasyon + dezenfeksiyon olarak tanımlanmıştır.

Ayrıca geri kazanılmış atıksuyun sulama yöntemleri (karık usulü sulama, kenar sulaması, yağmurlama sulama, damlatmalı sulama) sulanan bitkilerin yapraklarının zarar görmesi, kökte tuz birikmesi, sulama sonrası toprak su potansiyeli, verim kaybı olmaksızın tuzlu arıtılmış suyun uygulanabilirliği açısından değerlendirilmiştir. Bitki türüne göre sulama türlerinde hangi sulama suyu sınıfının kullanılabileceği belirlenmiştir.

## 5. Konya Kapalı Havzası

Konya kapalı havzası alanı 63757 km² olup, Türkiye alanının %8'dir. Konya, Niğde, Aksaray ve Karaman illeri Konya kapalı havzası içerisinde yer almaktadır. Ülke nüfusunun %4'ü, ki bu 3 milyondan daha fazla kişidir, Konya havzasında yaşamaktadır. Konya kapalı havzası su ihtiyacı 15 milyar $m^3$'tür. Mevcut su varlığına bakıldığında 1,93 milyar $m^3$'ü yerüstü suyu, 2,43 milyar $m^3$'ü ise yeraltı suyudur. Havzada yaklaşık 3 milyon ha tarım alanı bulunmaktadır. Toplamda havzada 4,36 milyar $m^3$ su varlığı olup, tarım alanlarının tamamının sulanabilmesi için 10,64 milyar $m^3$ ilave suya ihtiyaç bulunmaktadır.

Şekil 1'de dünyada ve ülkemizde yıllık ortama yağış miktarı verileri görülmektedir. Dünyada bu değer 1000 mm iken, ülkemizde 574 mm'dir. Yıllık ortalama yağış verilerinin Konya kapalı havzasında 378 mm'ye düştüğü, Konya ili için 322 mm ve Karapınar ilçesinde ise 250 mm değerlerine düştüğü görülmektedir (Aydın vd., 2016).




***Şekil 1.*** *Dünyada ve ülkemizde yıllık ortalama yağış miktarları (Özdemir ve Aydın, 2017)*

Tablo 5'te Konya çevresinde yetiştirilen bitkilerin su tüketimi ve net su ihtiyaçları verilmiştir. Yetiştirilmeye çalışılan bitkilerin su tüketiminin yağışa oranının ortalaması 2.4'tür (Özdemir ve Aydın, 2017).

***Tablo 5.*** *Konya çevresinde bitkilerin su tüketimi ve net su ihtiyaçları (Özdemir ve Aydın, 2017)*

| | **Buğday** | **Arpa** | **Şeker pancarı** | **Kuru fasülye** | **Mısır** | **Patates** | **Ayçiçeği** | **Sebze** | **Yonca** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Su tüketimi (mm)** | 441 | 420 | 825 | 535 | 685 | 605 | 615 | 750 | 1200 |
| **Net su ihtiyacı (mm)** | 400 | 350 | 705 | 480 | 630 | 540 | 500 | 705 | 1000 |
| **Su tüketimi/yağış** | 1,5 | 1,5 | 2,9 | 1,9 | 2,4 | 2,1 | 2,2 | 2,6 | 4,2 |

Konya ili 40.838 $km^2$ yüzölçümü ile Türkiye yüzölçümünün %5,24'lik kısmına sahip olup 1.859.078,8 ha alanda tarım yapılmaktadır. Yıllık yağış miktarı bölgeden bölgeye 300-760 mm arasında değişmekle birlikte bazı bölgelerde 300 mm'nin altında seyretmesi kuru ziraat yapılmasını mecbur kılmaktadır. DSİ 4. ve 18. Bölge Müdürlükleri verilerine göre Konya ilinde 609.299 ha alanda sulu tarım yapılmaktadır. Toplam tarımsal alanın %79'u tarla bitkileri, %3'ü meyveler, %2'si sebzeler için kullanılmakta %16'sı ise nadasa bırakılmaktadır. Tarımsal sulamada bitkinin ihtiyaç duyduğu su miktarı 4,5 milyar $m^3$'tür. Konya ilinin yeraltı ve yerüstü kullanılabilir su miktarı ise 3,1 milyar $m^3$'tür. Bu durum mevcut sulanan alanlar için Konya ilinin su potansiyelinin yetersiz olduğunu göstermektedir (Konya Tarımı, 2021).

2020 yılı TÜİK verilerine göre Konya ilinin alıcı ortamlara göre şebekeden deşarj edilen yıllık atıksu debisi 111.191 bin $m^3$'tür. 42 atıksu arıtma tesisi bulunup arıtılan atıksu miktarı 91.341 bin $m^3$'tür. Konya havzasındaki suyun sürdürülebilir kullanımı için arıtılmış atıksuların tarımsal sulamada kullanımı oldukça önemlidir.

## 6. Geri Kazanılmış Atıksuyun Sulamada Kullanımı

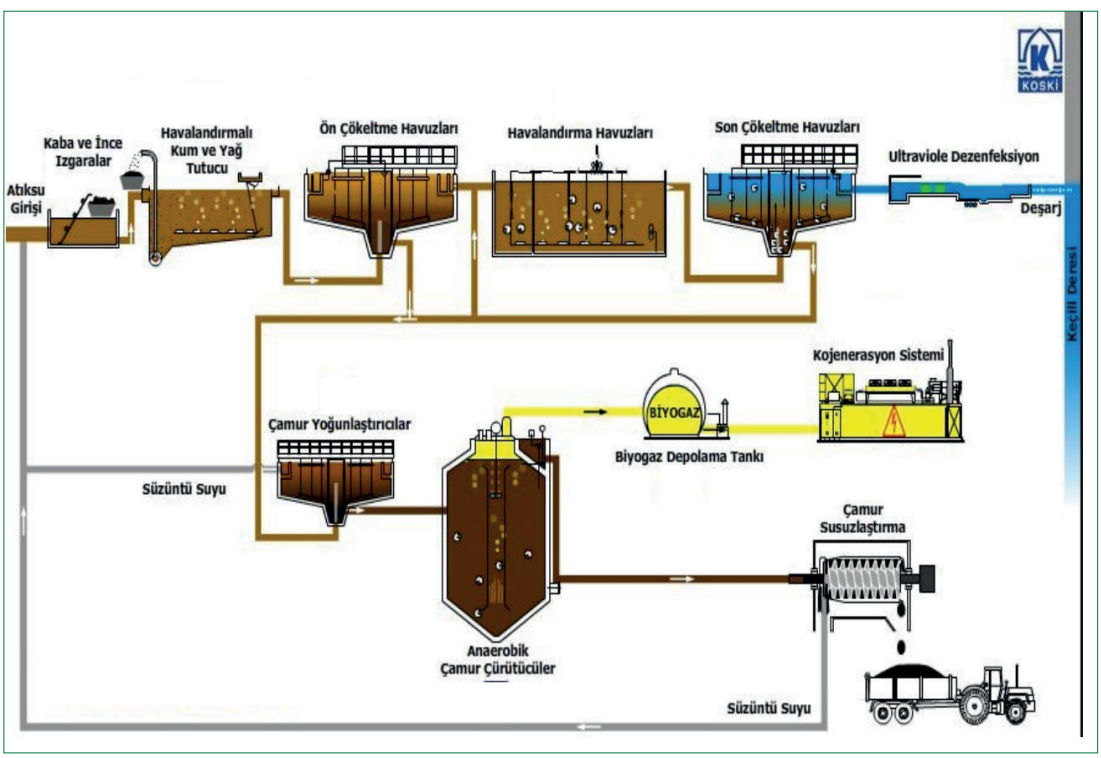
### 6.1. Konya Uygulama Örneği

Konya kent merkezi atıksu arıtma tesisisin toplam kapasitesi 1.600.000 nüfus eşdeğeri olarak planlanmış ve ortalama atıksu debisi yaklaşık 200.000 $m^3$/gün için 2009 yılında faaliyete alınmıştır. İşletmeye açıldığında arıtma tesisi yaklaşık 1,3 milyon kişiye hizmet vermekte olup nüfus artışına bağlı olarak tesisin mevcut kapasitesinin artırılması için projelendirme çalışmalarına başlanmıştır. Konya merkez atıksu arıtma tesisi kapasitesini iki katına çıkaracak II. Kademe uygulama projeleri ile 400.000 $m^3$/gün debi arıtım kapasitesine sahip olacaktır. Birleşik kanalizasyon sistemi ile toplanan evsel atıksu, endüstriyel atıksu (toplam atıksu debisinin yaklaşık %8'i) ve hastane atıksuları (toplam atıksu debisinin yaklaşık %3,5'i) atıksu arıtma tesisine iletilmektedir.

Şekil 2'de Konya merkez atıksu arıtma tesisinin görünümü, Şekil 3'te ise tesisin atıksu ve çamur arıtma akış şeması verilmiştir (KOSKİ, 2023). Konya'nın atıksuları 2010 yılına kadar arıtılmadan 2010 yılından sonra ise arıtılarak tahliye kanalı vasıtasıyla Tuz Gölü'ne deşarj edilmektedir. Tahliye kanalı yaklaşık 150 km boyunda taşkın ve drenaj sularının tahliyesi amacıyla inşa edilmiştir. Tahliye kanalı boyunca sular tarımsal alanların sulanmasında kullanılmaktadır (Şekil 4).



***Şekil 2.*** *Konya kentsel merkezi atıksu arıtma tesisi (KOSKİ, 2023)*




***Şekil 3.*** *Konya kentsel merkezi atıksu arıtma tesisi atıksu ve çamur akış şeması (KOSKİ, 2023)*



***Şekil 4.*** *Ana tahliye kanalı ve sulama görüntüleri*

Konya merkezi atıksu arıtma tesisi işletmeye alınmadan önce 2008 yılında kentsel atıksuların toplandığı ve ana tahliye kanalına iletildiği Aslım terfi merkezinden atıksu örnekleri alınarak Su Kirliliği Kontrol Yönetmeliği Teknik Usuller Tebliği'ne göre sulama suyu kalite kriterleri açısından değerlendirilmiştir. pH değeri açısından uygun olduğu, sülfat içeriği açısından 1. sınıf sulama suyu sınıfında olduğu tespit edilmiştir.

Elektriksel iletkenlik değerinin 1788 µS/cm değerinde olduğu yüksek tuzlu C3 sınıfına girdiği bu su ile sulanacak bitkilerin seçilmesi ve toprağın tuzluluk kontrolünün yapılması gerektiği belirtilmiştir. Elektriksel iletkenlik (EC) ve sodyum adsorpsiyon oranı (SAR) değerlerine göre sınıflandırma yapıldığında C3-S4 sınıfında yer aldığı çok yüksek sodyumlu ve yüksek tuzlu sular sınıfında olup 4. sınıf sulama suyu sınıfında ve ihtiyatla kullanılabileceği belirtilmiştir.

Bu atıksu ile sulanan toprakta sodikleşmeye sebep olacağı sodyum oranı yükseldikçe toprağın permeabilitesinin düşeceği ve toprağın fiziksel ve kimyasal yapısının değişeceği belirtilmektedir. Askıda katı madde (AKM), $BOİ_5$ ve fekal koliform değerleri açısından suyun 5. sınıf kalitede sulama suyu sınıfında kullanıma uygun olmayan zararlı su sınıfında yer aldığı tespit edilmiştir. Bor konsantrasyonu açısından duyarlı bitkiler için 3. sınıf sulama suyu niteliğinde olup, incelenen metaller (alüminyum, arsenik, kadmiyum, krom, kobalt, demir, kurşun, lityum, mangan, molibden, selenyum, çinko) açısından sınır değerlerin aşılmadığı belirlenmiştir. Arıtılmamış Konya kent atıksuyunun analizi yapılan parametreler açısından sulama suyu sınıflandırmasına göre 3. sınıf sulama suyu sınıfında yer aldığı çayır, mera, koruluk gibi alanların sulanmasında sulama amaçlı kullanılabileceği tespit edilmiştir (Aydın vd., 2008).

Aydın vd., (2015) arıtılmamış Konya kent atıksuları ile 40 yılı aşkın süredir sulanan tarımsal alanlardan toprak örnekleri ve yetiştirilen ürünlerden örnekler alarak toprak özellikleri ve ürün kalitesi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla atıksular ile sulanan alanlardaki topraklarda ağır metal (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, Hg) birikimi ölçülmüştür. Sulanmayan toprak örnekleri ve kuyu suyu ile sulanan toprak örnekleri kontrol örneği olarak alınmıştır. Atıksular ile sulanan topraklarda yetiştirilen buğdaylara ağır metal geçişi araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, Konya toprağının yüksek alkali özelliklerinin ve kil yapısının kirleticilerin hareketliliğini azalttığını ve toprağın üst tabakasında birikime neden olduğunu ortaya koymaktadır. Atıksu ile sulamanın toprağın elektriksel iletkenliğine yoğun etkisi olduğu belirlenmiştir. Atıksu ile sulanan topraklarda en yüksek metal konsantrasyonu Pb (5,32 mg/kg), Cr (37,1 mg/kg), Cu (31,5 mg/kg), Cd (11,4 mg/kg), Zn (91,5 mg/kg), Ni (134 mg/kg) ve Hg (0,34 mg/kg) metalleri için tespit edilmiştir. Atıksu ile sulanan toprakların Cd (8.23–11.6 mg/kg) ile kuvvetli bir şekilde kirlenmiş ve Ni (47.7-134 mg/g) ile orta ve kuvvetli derecede kirlenmiş olduğu tespit edilmiştir. Tespit edilen bu konsantrasyon değerlerinin ülkemizde tarımsal topraklarda bulunmasına müsaade edilen konsantrasyon değerlerini aştığı görülmüştür. Atıksu ile sulanan buğday tanesinde Pb (8,44 mg/kg), Cr (1,30 mg/kg), Cu (9,10 mg/kg), Zn (29,31 mg/kg) ve Ni (0,94 mg/kg) için maksimum konsantrasyonlar tespit edilmiştir. Ayrıca buğday tanesi örneklerinde Hg ve Cd tespit edilmemiştir. Türk Gıda Kodeksine göre, numune alınan arazide yetiştirilen buğday numunelerinde Pb kirliliği olduğu bulunmuştur.

Konya Atıksu Arıtma Tesisi'nde 1000 $m^2$ alana kurulmuş ileri arıtım ünitesi, atıksuların yeniden kullanımı için 150 $m^3$/saat kapasiteyle faaliyet göstermektedir. Konya kent atıksu arıtma tesisi çıkış suları ileri (üçüncül) arıtmadan sonra kent yeşil alanlarının (parklar, peyzaj alanı, refüj gibi) sulanması için yeniden kullanılmaktadır. Atıksu geri kazanım tesisinde, koagülasyon, ön klorlama, basınçlı multimedya filtrasyonu, UV dezenfeksiyon, son klorlama, geri kazanılmış atıksuyun depolanması ve pompalanması üniteleri yer almaktadır. Mor şebeke adı verilen dağıtım hattı ile damlama usulü sulama yapılmaktadır. Mor şebeke suyu, 3 milyon 300 bin $m^2$ kısıtlanmış yeşil alan sulamasında kullanılmaktadır. Şekil 5'te atıksu geri kazanım tesisi ve yeşil alan sulamasıyla ilgili görseller verilmiştir (KOSKİ, 2023).

Mor şebeke, -yönetmeliklerde belirtilen standartlara uygun olarak üretilen geri kazanılmış atıksu-22 km'lik ana iletim hattı ile Türkiye'de ilk olma özelliği taşımaktadır. Mor şebeke sistemi, 79 bin 772 $m^3$'ü 2020 yılında olmak üzere devreye alınmasından bugüne kadar toplam 1.806.660 $m^3$ atıksu geri kazanımı sağlayarak aynı oranda içme ve kullanma suyundan tasarruf sağlamıştır (KOSKİ, 2023).

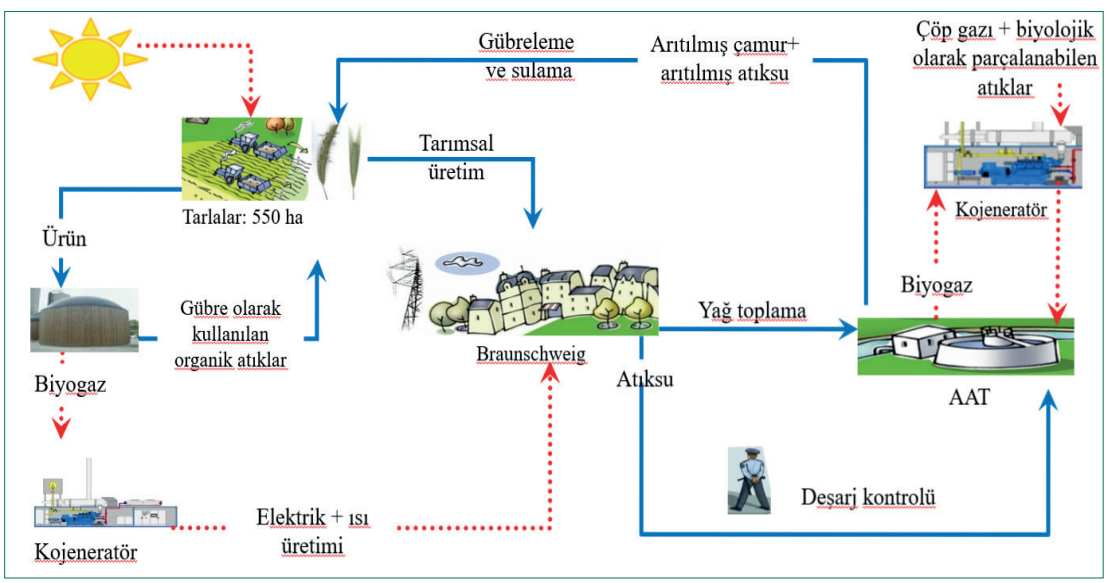



***Şekil 5.*** *Konya atıksu geri kazanım tesisi ve yeşil alan sulaması (KOSKİ, 2023)*

### 6.2. Almanya Uygulama Örneği

Almanya'nın Braunschweig kentinde atıksu kullanımı 1894 yılında ilk sulama alanı ile başlamış, 1954 yılında atıksu yönetimi oluşturulmuş, 1955-1966 yılları arasında atıksu ile sulama yapılan alan 3000 ha genişletilmiştir. 1955-1979 yılları arasında mekanik ön arıtmadan sonra atıksular ile yağmurlama sulama yapılmıştır. 1979-1991 yılları arasında yeni ileri atıksu arıtma tesisleri yapılmış, 1985-1990 yılları arasında sulama alanları düzenlenmiştir. 2000 yılından sonra ise çamur çürütücüler devreye alınmaya başlamıştır (Bahadır, 2018).

Şekil 6'da Braunschweig'da atıksu arıtma, atıkların değerlendirilmesi ve enerji üretimi ile ilgili çevrim verilmiştir. Braunschweig'da kanalizasyon sisteminde deşarj izleme kontrolleri yapılmaktadır. Böylece arıtma tesisine gelen atıksu özellikle kaçak deşarjlar açısından izlenmektedir. Atıksu arıtma tesisinde oluşan çamurlar ve şehirden toplanan atık yağlar anaerobik çürütücülerde metan gazına dönüştürülmektedir. Biyogaz, deponi sahasından gelen gaz ve biyolojik olarak parçalanabilen atıkların fermantasyonu sonucu oluşan gazlar kojeneratör ünitelerinde enerjiye dönüştürülmektedir. Stabilize edilmiş çamur ve arıtılmış atıksu tarım alanlarının gübre ve su ihtiyacını karşılamak için değerlendirilirken 550 ha alanda yetiştirilen ürünler biyogaz tesislerinde elektrik enerjisi elde edilmek üzere kullanılmaktadır. Anaerobik çürütme sonucu oluşan çamur tarım alanlarında değerlendirilirken, kojeneratörlerden elde edilen elektik ve ısı üretimi ise şehrin ihtiyacı için kullanılmaktadır. Sulanan alanlarda hububat, patates, şeker pancarı, mısır ve diğer ürünler yetiştirilmektedir (Mesek, 2012).




***Şekil 6.*** *Braunschweig'da atıksu arıtma, atıkların değerlendirilmesi, enerji üretimi (Mesek, 2012)*

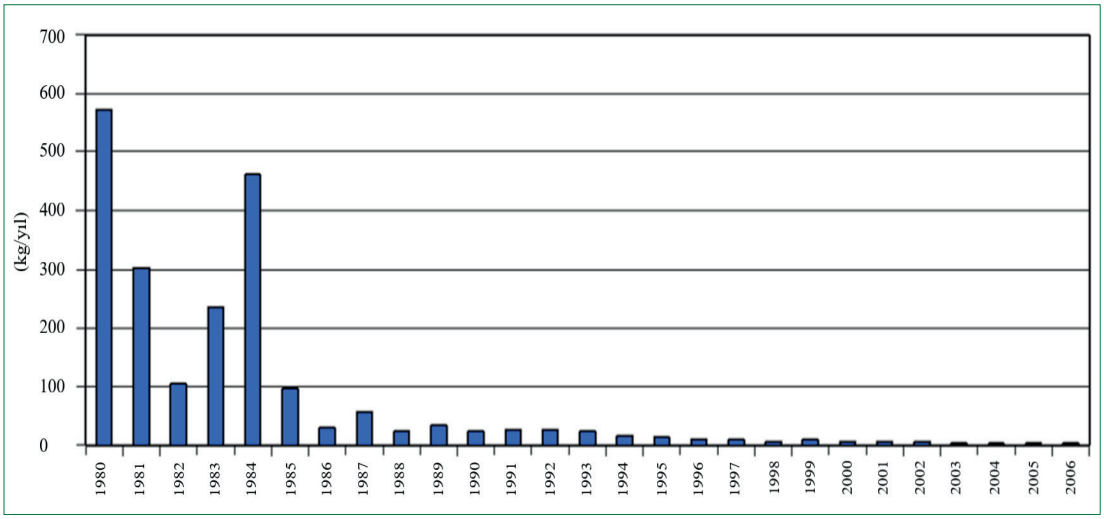
Almanya Braunschweig'da bulunan Gut Steinhof atıksu arıtma tesisi nüfus eşdeğeri 385.000 kişi olup, debisi 60.000 $m^3$/gündür. Tesiste fiziksel (ızgara, kum tutucu, ön çökeltim), biyolojik arıtma (aktif çamur, son çökeltim) ile nütrient giderimi sağlanmaktadır. Ön ve son çökeltim çamurları yoğunlaştırma, anaerobik çürütücü, santrifüj susuzlaştırma, çamur depolama süreçlerinden sonra tarımsal alanlarda kullanılmaktadır. Arıtma tesisi çıkış suları ile anaerobik çürütücüden çıkan çamur karıştırılarak yağmurlama sulama ile 3000 ha alanın sulanmasında kullanılmaktadır. Ayrıca arıtılmış atıksu ile 200.000 $m^3$/gün kapasiteye sahip 200 ha infiltrasyon alanında tamponlama ve biriktirme yapılan bir yapay sulak alan oluşturulmuştur. Yapay sulak alan göçmen kuşların konaklaması ve rekreasyonel alanı olarak kullanılmaktadır (Şekil 7). İnfiltrasyon suları Oker nehrine verilmektedir (Bahadır, 2018).



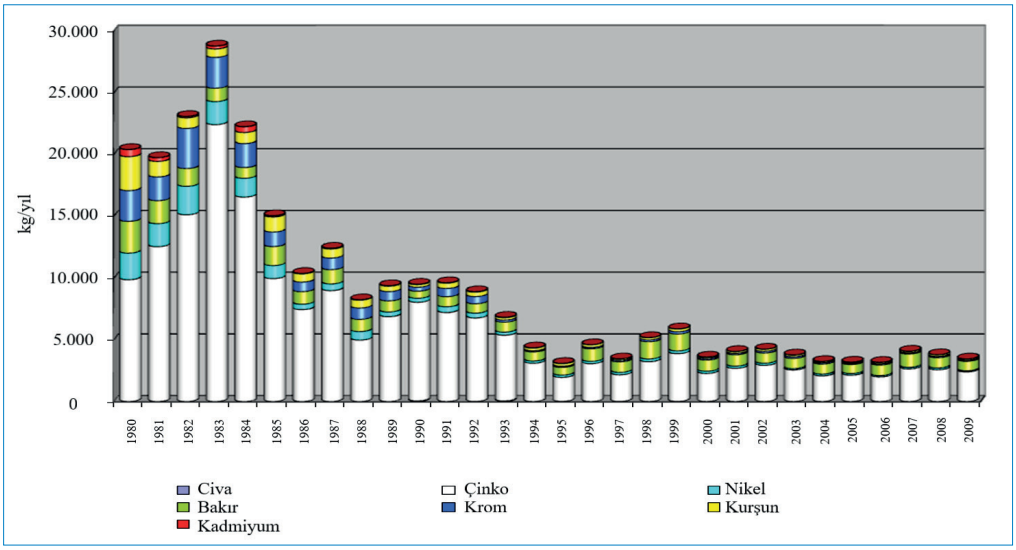
***Şekil 7.*** *Gut Steinhof, Braunschweig, Almanya, yapay sulak alan (Bahadır, 2018)*

Atıksu yönetim alanının %38'inde biyogaz üretimi için bitki yetiştirilmekte ve kapasitesi 2,5 $MW_{el}$ olan biyogaz tesisi işletilmektedir. Braunschweig'da yıllık arıtılan atıksu miktarı 21 milyon $m^3$ olup, bunun 15 milyon $m^3$'ü yağmurlama sulama için kullanılırken, 6 milyon $m^3$'ü ise yapay sulak alanlar için kullanılmaktadır. Oluşan arıtma çamurunun ise %60'ı (2750 ton kuru madde/yıl) yağmurlama sulama alanında, %40'ı (2000 ton kuru madde/yıl) ise başka zirai alanlarda kullanılmaktadır (Bahadır, 2018).

Atıksu ve arıtma çamurlarının tarımsal alanlara uygulanması sonucu toprak ve yeraltı sularını korumak için önlemler alınmaktadır. Braunschweig Atıksu Yönetmeliği'nde kanalizasyona deşarj için katyonlar (civa, kadmiyum, krom, arsenik, gümüş, bakır, nikel, kurşun, baron, kobalt, selenyum, çinko, antimon), anyonlar/elementler (serbest klor, serbest ve toplam siyanür, sülfid, toplam fosfor), organikler (POX/AOX, BTXE + styrene, toplam hidrokarbonlar, fenol indeksi, PAH, yağ ve gres, boya maddesi) ve toksisite için limit değerler verilmiştir. Kirliliği kaynağında önlemek için dolaylı deşarj izlemesi gerçekleştirilmektedir. 2009 yılından bu yana kanalizasyondan alınan biyofilm örneklerinin analizleri ile ağır metaller ve deşarj edenlerin tespiti yapılmaktadır. Yapılan deşarj izleme kontrolleri sonucunda arıtılmış çamurdaki kadmiyum yükünün azalması Şekil 8'de, sulama suyundaki ağır metal değişimi ise Şekil 9'da verilmiştir (Bahadır, 2018).




***Şekil 8.*** *Arıtılmış çamurdaki yıllar içerisindeki kadmiyum yükü değişimi (Bahadır, 2018)*




***Şekil 9.*** *Geri kazanılmış atıksudaki yıllar içerisindeki ağır metal yükü değişimi (Bahadır, 2018)*

Ayrıca arazide izleme çalışmaları yapılmaktadır. 45 yıldan beri toprağın temizleme kapasitesinin izlenmesi için deşarj edilen suyun haftalık testleri yapılmaktadır. Sulama suyu uygulanan alanlarda toprak ve su kalitesi izlenmektedir. 500 hektarlık alanda 6 drenaj çıkışı ve 3 yeraltı suyu izleme kuyusu (33 taneden) yılda 4 kez yetkili idare tarafından kontrol edilmektedir. pH, elektriksel iletkenlik, çözünmüş oksijen, toplam organik karbon, kimyasal oksijen ihtiyacı, biyolojik oksijen ihtiyacı, amonyum azotu, nitrit ve nitrat azotu, toplam azot ve toplam fosfor parametreleri alınan örneklerde izlenmektedir. Arıtılmış atıksuyun ve arıtma çamurunun tarım

alanında kullanılmasıyla atıksudaki ve çamurdaki fosforun tamamına yakın (yaklaşık 200 t/yıl) yeniden kullanılmaktadır. Sulamanın yapıldığı yaz döneminde arıtılmış çamur arıtılmış atıksu ile karıştırılarak araziye uygulanmaktadır. Sulama yapılmayan (kış) dönemde ise çamur susuzlaştırma işleminden sonra depolanarak kuru gübre olarak uygulanmaktadır. Sadece küçük miktarlarda fosfor yapay gübre olarak gerekmektedir. Böylece kimyasal gübre bağımlılığı azalmış olup fosfat rezervleri korunmaktadır. Azotun %40'ı yaz döneminde sulama ile, %10'u ise kuru gübre olarak kullanılmaktadır. %45-50 oranında denitrifikasyondan kaynaklanan azot kaybı vardır. Nitrat topraktan hızla uzaklaştırıldığı için suni gübrelemeye ihtiyaç olmaktadır (Bahadır, 2018).

## 7. Sonuçlar ve Öneriler

Su kıtlığının sebepleri insan tüketimi için su kaynaklarının dünya üzerinde eşit dağılmaması, nüfus artışına, yaşam kalitesine ve ekonomik gelişmeye bağlı olarak artan su ihtiyacı, iklim değişikliği ve var olan su kaynaklarının kirlenmesi olarak sıralanabilir. Toplam arazi alanının %40'ının kurak ve yarı kurak iklim bölgesinde yer alması ve bu nedenle sulama uygulamaları için toplam su kullanımının %70'e kadar yükselmesi arıtılmış atıksuyun yeniden kullanımını zorunlu kılmaktadır. Arıtılmış atıksuyun özellikle tarımsal ve yeşil alan sulamalarında kullanılması dünya çapında hükümetler ve resmi kuruluşlar tarafından teşvik edilen ve giderek yaygınlaşan bir uygulamadır. Atıksuyun yeniden kullanımının faydaları şu şekilde sıralanabilir:

Atıksu yöneticisi (şehir) açısından; yüksek atıksu arıtma verimliliği sağlanır, ilave ileri arıtma gerektirmez, çamur bertarafı için çözüm sağlanır, atıksu arıtma tesisine daha az yatırım gerekir.

Atıksuyu kullananlar (çiftçiler) açısından; sulama suyu temini ve dağıtımı sağlanır, besin içeriğinin (N/P) kullanımı ve organik karbonun kullanılmasını sağlar.

Ekoloji/su kaynaklarının yönetimi açısından; kaynakların korunması sağlanır, yüzey suyu kirlenmesini önler, yeraltı suyu çekimi yerine besleme imkânı sağlanır.

Sürdürülebilir su yönetimi açısından; çoklu su kullanımı ve değerli bileşenlerin geri kazanılmasını sağlar.

Atıksuların tarımsal sulamada kullanımı toprakta kimyasal ve biyolojik kirletici maddelerin birikmesine neden olarak insan ve çevre sağlığı açısından riskler oluşturabilir. Ayrıca toprağın fizikokimyasal ve mikrobiyolojik özelliklerini değiştirerek toprak üretkenliğini etkileyebilir. Bu nedenle, atıksuyun tarımda sürdürülebilir ve güvenli yeniden kullanımı için gerekli parametreler kullanım standartlarına eklenmelidir. Mevcut atıksu arıtma tesisleri atıksuyun yeniden kullanımında çevresel etkileri en aza indirecek şekilde gerekli prosesler ile modifiye edilmelidir.

## 8. Kaynaklar / References


Al Baz, I., Otterpohl, R. & Wendland, C. (2008). *Efficient management of wastewater, its treatment and reuse in water-scarce countries*, ISBN 978-3-540-74491-7. Springer.

Asano, T., Burton, F.L., Leverenz, H.L., Tsuchihashi, R. & Tchobanoglous, G. (Ed.). (2007). *Water Reuse, Issues, Technologies, and Applications*, ISBN-13: 9780071459273, Metcalf & Eddy.

Aydın, M.E. & Kumcu, Ş.Y. (2018). Assessment of water management in irrigation applications in the Karapınar basin, Konya, Türkiye, Regional Workshop on Water - Energy - Food - NEXUS in MENA Region, Aswan, Egypt November 11- 17, 2018.

Aydın, M.E., Aydın, S. & Beduk, F. (2016). Konya Plain Project (KOP) – Konya irrigation, industrial and domestic water projects, Expert Workshop on Water Challenges in MENA Region 2016-2050 Aqaba, 24- 28 April, Jordan.

Aydın, M.E., Aydın, S., Bedük, F., Tor, A., Tekinay, A., Kolb, M. & Bahadır, M. (2015). Effects of long-term irrigation with untreated municipal wastewater on soil properties and crop quality. *Environmental Science and Pollution Research*. 22: 19203-19212.

Aydın, M.E., Bircan, E. & Özcan, S. (2008). Evsel atıksuların geri kazanılarak sulamada kullanılması, Konya Kapalı Havzası Yeraltısuyu ve Kuraklık Konferansı, Çevre ve Orman Bakanlığı DSİ Genel Müdürlüğü, 11-12 Eylül 2008, Konya.

Bahadır, A.M. (2018). Reuse of reclaimed wastewaters – the Braunschweig example, Sürdürülebilir Su Yönetimi Çalıştayı, 12-14 Mart, Konya.

Barcelo, D. & Petrovic, M. (2011). The handbook of environmental chemistry, wastewater treatment and reuse in the Mediterranean Region, ISBN: 1867-979X. Springer.

Çevre, Orman ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2010), Atıksu Arıtma Tesisleri Teknik Usuller Tebliği, Tarih: 20 Mart 2010, Sayı: 27527.

Falkenmark, M., Lundqvist, J., & Widstrand, C. (1989). Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development. In Natural resources forum (Vol. 13, No. 4, pp. 258-267). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd.

Konya Tarımı (2021), Konya İl Tarım ve Orman Müdürlüğü Koordinasyon ve Tarımsal Veriler Şube Müdürlüğü Enformasyon Birimi.

KOSKİ (2023). www.koski.gov.tr (11.04.2023)

Mesek, C. (2012). Braunschweig a reference for sustainable development in Germany, Workshop on Reuse of Wastewater on Farmland Irrigation and Braunschweig Example, 19-20 Aralık, Konya.

Özdemir A. & Aydın, M.E. (2017). Problems caused by improper water and land management and global climate change effect in Karapınar Basin (Konya, Türkiye), Regional workshop on Water efficient cities, November 03-08, 2017, Marrakech, Morocco.

Tchobanoglous, G., Burton, F.L. & Stensel, H.D. (2004). *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, Fourth Edition, ISBN-13: 9780070418783, Metcalf & Eddy.

TUİK (Türkiye İstatistik Kurumu) (2021), Haber Bülteni, Yayım Tarihi: 16.12.2021, Sayı: 37197.

## Yazarlar Hakkında / About Authors

**Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN | TÜBA Asli Üyesi | Necmettin Erbakan Üniversitesi | meaydin[at]erbakan.edu.tr | ORCID: 0000-0001-6665-198X**

Mehmet Emin Aydın, Konya Selçuk Üniversitesi, İnşaat Mühendisliğinden 1985 yılında mezun oldu. 1993 yılında İngiltere, Loughborough Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümünde suların arıtımı alanında doktorasını tamamladı. Selçuk Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümüne 1997 yılında Doçent 2003 yılında Profesör olarak atandı. 2012 yılında Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümüne Profesör olarak atandı. Halen 2018 yılından beri aynı üniversitenin İnşaat Mühendisliği Bölümünde Profesör olarak çalışmaktadır. Araştırma alanı Su Temini, atıksuların uzaklaştırılması, su kirliliği, su arıtma, PAH, PCB, pestisitler, kalıcı organik kirleticiler, ekotoksikoloji alanlarını kapsamaktadır. Prof. Dr. Aydın'ın Uluslararası hakemli dergilerde ve sempozyum kitaplarında 235 makalesi, Ulusal sempozyumlarda 82 bildirisi, 14 kitap bölümü ve 6 kitap editörlüğü veya ortak editörlüğü vardır.

**Prof. Dr. Mehmet Emin AYDIN | TÜBA Full Member | Necmettin Erbakan University | meaydin[at]erbakan.edu.tr | ORCID: 0000-0001-6665-198X**

Mehmet Emin Aydın has studied of Civil engineering at Selçuk University in Konya, Türkiye (1980-1985) and received his PhD in 1993 in the field of drinking water treatment at Civil Engineering Department of Loughborough University of Technology in England. He is appointed as Assoc. Prof. Dr. in Environmental Engineering of Selçuk University in 1997. Since 2003, he is full Professor in Environmental Engineering initially at Selçuk University and then since 2012 in Necmettin Erbakan University in Konya, Türkiye. He is working as full Professor in Civil Engineering of Necmettin Erbakan University since 2018. His teaching and research cover water supply, wastewater disposal, water pollution, water and wastewater treatment, ecotoxicology, PAHs, PCBs, pesticides, pharmaceuticals and illicit drugs in environment. Prof. Dr. Aydın published 235 papers in international peer-reviewed journals and proceedings volumes; 82 presentations in National symposiums; 14 international book chapters, 6 book editorships and co-editorships.

**Prof. Dr. Senar AYDIN | TÜBA Genç Akademi Üyesi | Necmettin Erbakan Üniversitesi | sozcan[at]erbakan.edu.tr | ORCID: 0000-0002-0960-480X**

Senar Aydın Konya Selçuk Üniversitesi Çevre Mühendisliği bölümünden 1999 yılında mezun olmuş, 2007 yılında aynı bölümde Çevrede PAH, PCB, Pestisitler gibi Mikrokirleticilerin analizi konusunda doktorasını tamamlamıştır. 2000 yılından itibaren Araştırma Görevlisi olarak çalışmakta olduğu aynı bölümde 2010 yılında Yardımcı Doçent olarak atanmıştır. Konya Necmettin Erbakan Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümüne 2012 yılında Doçent olarak, 2017 yılında Profesör olarak atanmıştır. Ders verdiği ve araştırma yaptığı alanlar temel işlemler, temel işlemler laboratuvar uygulamaları, su kirliliği, su arıtma, çevrede PAH, PCB, pestisitler, farmasötikler, uyuşturucuların analizi ve ekotoksikoloji alanlarını kapsamaktadır. 2011-2021 yılları arasında Çevre Mühendisliği Bölüm başkanlığı görevini yürütmüştür. 2013 yılında TÜBA üstün başarılı genç bilim insanı (GEPİP) ödülü almıştır. Senar Aydın uluslararası hakemli dergilerde ve sempozyum kitaplarında 125 makale, ulusal sempozyumlarda 52 bildiri ve 12 uluslararası kitap bölümü yayınlamıştır.

**Prof. Dr. Senar AYDIN | TÜBA Young Academy Member | Necmettin Erbakan University | sozcan[at]erbakan.edu.tr | ORCID: 0000-0002-0960-480X**

Senar Aydin has studied in Environmental engineering department at Selçuk University in Konya (1995-1999) and received her Doctorate in 2007 in the field of Analyses of micro pollutants such as pesticides, PAHs and PCBs in Environment at Environmental Engineering Department of Selçuk University. Senar Aydın was appointed as Assistant Prof. Dr. in Environmental Engineering Department of Selçuk University in 2010 and then as Associate Prof. Dr. in 2012. Since 2017 she is full Professor in Environmental Engineering Department of Necmettin Erbakan University in Konya, Türkiye. Her teaching and research cover unit processes, laboratory application of unit processes, water pollution, water and wastewater treatment, ecotoxicology, PAHs, PCBs, pesticides, pharmaceuticals and illicit drugs in environment. She was head of department between 2011 - 2021. She was awarded as excellency in science among young scientist by Turkish academy of sciences (TUBA) in 2013. Senar Aydın published 125 papers in international peer-reviewed journals and proceedings volumes; 52 presentations in National symposiums; 12 international book chapters.

# İKLİMLER, DEĞİŞİM NEDENLERİ VE SONUÇLARI

## CLIMATE, REASONS FOR CHANGE AND RESULTS

*Doğan YAŞAR*

DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch12

# İKLİMLER, DEĞİŞİM NEDENLERİ VE SONUÇLARI

***Doğan YAŞAR***
*Dokuz Eylül Üniversitesi*

**Özet**

İklimler, ortalama onar yıllık dönemlerden başlayarak milyonlarca yıllık dönemler halinde sürekli değişim gösteren ve dolayısı ile dünyada başta su olmak üzere, tarım, balıkçılık ve enerjiyi kontrol altında tutan doğa olaylarıdır. Söz konusu bu değişimlerin ana nedenleri ise levhaların hareketi, dünyanın dönüş parametreleri ve güneşten gelen enerjideki değişimlerdir. Tüm bu değişimler, iklimlerin gerek uzun ve gerekse kısa dönemler içerisinde, kurak ve yağışlı döngüler halinde değişim göstermesine neden olurlar. Bu döngülerden en kısa sürelisi ortalama 15 - 20 yıl civarında olup bu sürenin 7 ila 10 yılı yağışlı (bölgesel ortalamaların üzerinde) ve 7 ila 10 yılı da kurak (bölgesel ortalamaların altında) olarak geçmektedir. Günümüzde, su kaynakları yönetimlerine temel olacak tahminlerin yapılabildiği onar yıllık salınımların yanı sıra, uzun vadeli tahminlerin de yapılması gereklilik göstermektedir. Bu tahminlerin uzun vadede geliştirilmesi, kanun yapıcılara kuraklık nedeni ile doğabilecek ekonomik kayıpların önüne geçilebilmesi için alacakları kararlara temel olacak bilginin sağlanması açısından önemlidir. Bu makalede iklimsel değişimlerin su, tarım, balıkçılık, enerji ve hava kalitesi üzerinde neden olduğu etkiler tartışılmış ve bu tür iklimsel değişimlerin etkilerini avantaja çevirebilmek için neler yapılması gerektiği konusunda öneriler getirilmiştir.

***Anahtar Sözcükler***
*İklimsel değişiklikler, Kuraklık, Su, Tarım, Enerji*

# CLIMATE, REASONS FOR CHANGE AND RESULTS

***Doğan YAŞAR***
*Dokuz Eylül Üniversitesi*

**Abstract**

Climates are natural phenomena that constantly change in periods of millions of years, starting from an average of ten years, and therefore keep agriculture, fisheries and energy, especially water, under control in the world. The main reasons for these changes are the movement of the plates, the rotation parameters of the earth and the changes in the energy coming from the sun. All these changes cause climates to change in both long and short periods, in dry and rainy cycles. The shortest period of these cycles is around 15-20 years, 7 to 10 years of this period are rainy (above the regional averages) and 7 to 10 years are dry (below the regional averages). Today, it is necessary to make long-term estimations as well as the ten-year oscillations that will be the basis of water resources management. The development of these forecasts in the long term is important in terms of providing the lawmakers with the information that will be the basis for the decisions they will take in order to prevent the economic losses that may arise due to drought. In this article, the effects of climatic changes on water, agriculture, fisheries, energy and air quality were discussed and suggestions were made about what should be done to turn the effects of such climatic changes into an advantage.

***Keywords***
*Climatic changes, Drought, Water, Agriculture, Energy*

## 1. İklimleri Kontrol Eden Ana Faktörler

Dünyada yaşanan en büyük doğal afetler kuşkusuz kuraklıklardır. Deprem ve sel gibi doğal afetlerin yalnızca oldukları yere hasar vermelerine karşın, kuraklığın aynı anda tüm dünyadaki yaşamı doğrudan etkilemesi nedeni ile, iklimler nedenleri ve sonuçları konusunda çok detay çalışılması gereken doğa olaylarıdır. Dünya tarihine baktığımızda kuraklık afetleri nedeni ile ilk barajın günümüzden 6.000 yıl önce Ürdün'de (Jawa) kurulması, Anadolu'da da ilk barajın 3240 yıl önce Hitit'ler tarafından inşa edilmesi insanlığın zaman zaman, dünya nüfusunun çok az olduğu dönemlerde dahi, çok sert ve uzun kuraklık afetleri ile karşılaştığının en büyük göstergeleridir. İklim değişikliklerinin ana nedeni ise atmosferdeki ısıtıcı ve soğutucu gazların oranlarının sürekli değişimi ve bu değişimlere bağlı olarak da yağış rejiminin değişmesidir.

Atmosferde değişik gazlar bulunmaktadır. Bu gazların toplamının %78'i nitrogen, %20,9'u da oksijendir. Geriye kalan %1'ini de sera gazları da dediğimiz $CO_2$ ve metan gibi ısıtıcı gazlar ile sülfür gibi soğutucu (termostat) gazlar oluşturur. Atmosferde %1 civarında olan bu gazların oranlarının, kendi içlerindeki küçük değişiklikler nedeni ile iklimler, ya "ısınma" ya da "soğuma" trendi içinde olurlar. Isıtıcı "sera" gazlarının oranı artıp, soğutucu "termostat" gazlarının oranı düştüğünde dünya ısınma dönemine ve bunun tersi olduğunda da soğuma dönemine girer. Sıcaklıkların artması sonucu yağmur artar ve bu nedenle küresel ısınma dönemlerine Yağmur Çağı (Rain Age), sıcaklıkların düşmesi sonucu oluşan küresel soğuma dönemlerine de Buzul Çağı (Ice Age) denir. Söz konusu ısıtıcı ve soğutucu gazların oranın dünyadaki tüm canlı ya da cansız maddeler ile uzaydaki değişimler belirlese de ana oranlarını başlıca 3 ana faktör belirler.

1- Levha tektoniği

2- Milankovitch Döngüleri

3- Güneş Patlamaları

***1-Levha Tektoniği:*** En büyük iklim döngüsü olup 500 milyon yıllık bir süreci kapsar. Kıtalar her 500 milyon yılda bir bir araya gelirler, ayrılırlar ve yeniden bir araya gelirler. Bu sürenin 250 milyon yılı ayrılma ve 250 milyon yılı da birleşme olarak gerçekleşir. Isıtıcı gazlardan $CO_2$ konsantrasyonu kıtaların bir araya geldiği zamanlarda 2000 ppm'lere ve sıcaklıklar da ortalama 25 derecelere çıkar. Kıtaların maksimum ayrılma döneminde de ortalama sıcaklık 12 derecelere kadar düşer. Halen günümüzde $CO_2$ gazı oranı 380 ppm civarında olup dünyadaki ortalama sıcaklık da 14,7 derece civarlarındadır. Ayrıca insanoğlu da dünyadaki yaşamına, 3-4 milyon yıl önce, aynı zamanda karaların maksimum ayrılma dönemi olan, son 250 milyon yılın en soğuk döneminde başlamıştır (Hay, 1996).

***2- Milankovitch Döngüleri:*** Dünyanın gerek kendi ve gerekse güneş etrafındaki dönüş parametrelerinin değişimidir. Dünya, bu döngü içerisinde majör olarak, ortalama her 100.000 yılda ısınma ve soğuma dönemini yaşar. Majör soğuma dönemlerinde, gerçek kurak dönemler başlar ve deniz seviyeleri 120 metre kadar aşağıya düşer (Yaşar, 1994). Bu döngünün içinde de daha küçük döngüler bulunur. Son 18.000 yıldan beri majör olarak ısınma dönemindeyiz. Bu döngü ile ilgili gazların alt ve üst limitlerini levhaların konumu belirler (Kenneth, 1982).

***3- Güneş Patlamaları:*** Dünyanın ana enerji kaynağı olan güneşin yüzeyinde sürekli patlamalar olmaktadır. Ancak bu patlamalar da son derece düzenlidir. Bu patlama sayıları ortalama her 11 yılda bir maksimuma çıkar ve sonrasında minimuma iner. Standart sapmaları çok azdır. Patlama sayıları ile alansal büyüklükleri arttıkça dünyaya gelen enerji artar ve bunun sonucu küresel olarak sıcaklık ve yağış artar. Bu nedenle güneşteki patlamaların azaldığı yıllarda dünyamız genel olarak kuraklık yaşar (Yıldız & Yaşar, 2009).

## 2. İklimi Belirleyen Isıtıcı ve Soğutucu Gazlar

Atmosferdeki Karbon ve Sülfür gibi ısıtıcı ve soğutucu gazların "ana" oranları, yukarıda özetle açıklanan bu 3 faktör tarafından belirlenir. Ancak, dünyada canlı ya da cansız tüm varlıkların iklimleri kontrol ettiğini unutmamak gerekir. Denizden alından bir kuru gram örnekte ortalama 400.000 (dörtyüzbin) fosil olması da bunun en güzel göstergesidir. Her bir litre deniz suyunda bulunan ortalama 1.000.000 (bir milyon) canlı ise ki bunlara iklim regülatörleri denir, sürekli olarak atmosferle gaz dengelerini sağlar. Kısaca atmosferdeki ısıtıcı ya da soğutucu gazların oranını öncelikli olarak okyanuslardaki planktonlar belirler. Volkanlar ve Plankton (mikroskopik canlılar) başta olmak üzere akıntılar, Pasifik ve Atlantik Salınımları gibi birçok faktör tarafından kontrol edilir. Örneğin volkanlar, termostat gazı olarak da bilinen soğutucu ($SO_{2)}$ gazının ana sağlayıcılarıdır.

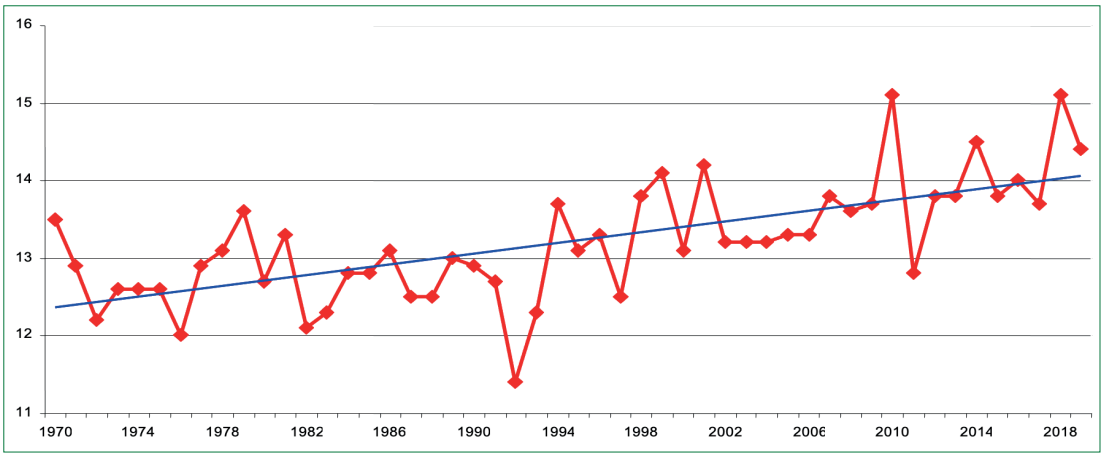
Dünyada volkanizmaların arttığı yıllarda ortalama sıcaklık düşer ve dolayısı ile yağışlar azalır ve kuraklık başlar. Yine aynı şekilde planktonlar en büyük iklim regülatörleridir. Her 1 litre deniz suyunda ortalama 1.000.000 (milyon) civarında, başta plankton olmak üzere mikro oraganizma bulunur ve bunların yaşam süreleri çok azdır. Bu organizmalar havadan $CO_2$ gazını alarak kabuklarını ($CaCO_3$) oluşturlar ve ortama DMS (sülfür gazı) atarak dünyadaki sıcaklık dengesinin korunmasını sağlarlar (Malin vd., 1992).

## 3. Sıcaklık ve Yağış İlişkisi

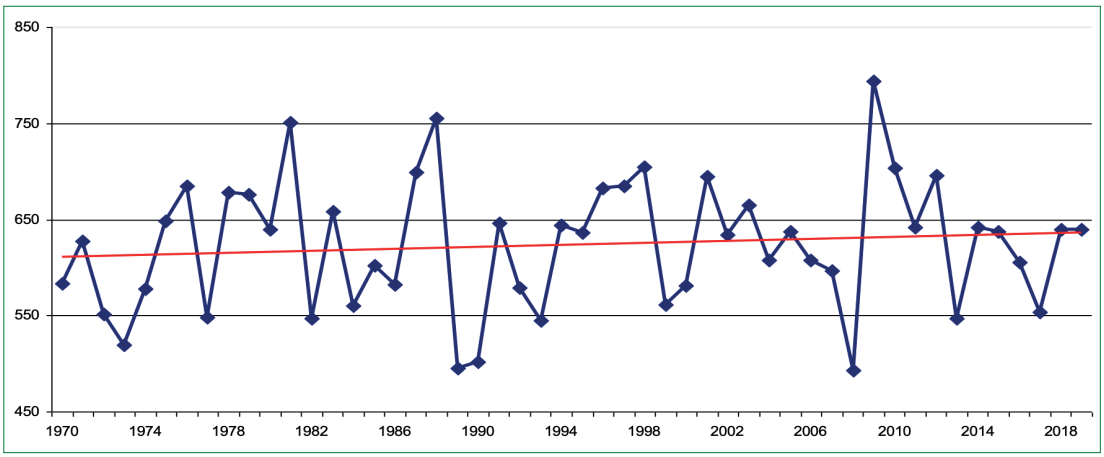
Günümüzde insanoğlunu etkileyen en önemli iklimsel döngüler, kuşkusuz onar yıllık döngülerdir (Van Oldenborgh & Burgers, 2005). İklimsel döngülerden en kısa sürelisi olan onar yıllık salınımların neden olduğu iklimsel değişimler sırasında, her 15 - 20 yıllık sürenin, yaklaşık 7 ila 10 yılı yağışlı (bölgesel ortalamaların üzerinde) ve 7 ila 10 yılı da kurak (bölgesel ortalamaların altında) olarak geçmektedir.

Söz konusu yağışların azalması ya da artması sıcaklıklara bağlı olarak gelişir. Küresel olarak sıcaklıkların arttığı dönemlerde yağışlar artar ve sıcaklıkların düştüğü dönemlerde de yağışlar düşer. Diğer bir deyişle sıcaklıklar, yağışları kontrol eden ana mekanizmalardır (Çetin, 2016). Türkiye'nin de sıcaklık ve yağış verileri incelendiğinde, sıcaklık ve yağışın birlikte hareket ettiği görülür (Şekil 1,2).

Yağış sıcaklık ilişkisini daha detaylı incelediğimizde ise yağışların kış sıcaklıkları ile ilişkili oldukları görülür. Kış aylarında sıcaklık artışı bol yağışlara, sıcaklık düşüşü ise kuraklığa neden olmaktadır. Buna örnek olarak Denizli 1975-2006 arası kış sıcaklık ile yağış ilişkisi Şekil 3'de verilmiştir.



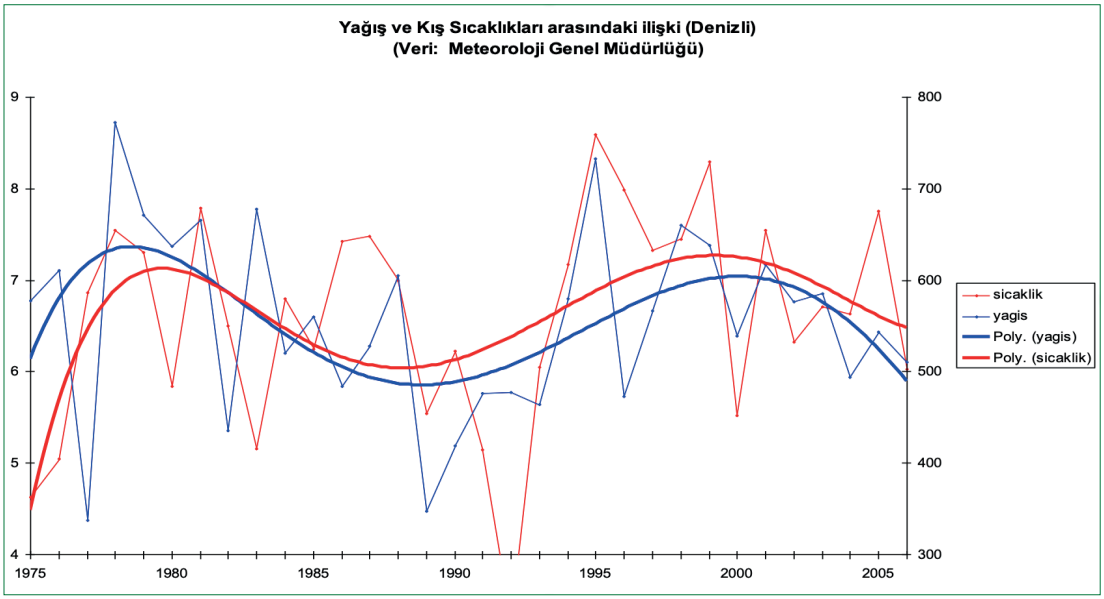

***Şekil 1.*** *Türkiye 1970-2019 sıcaklık grafiği ($^0$C) (URL 1)*




***Şekil 2.*** *Türkiye 1970-2019 yağış grafiği (mm/m$^2$) (URL 2)*

Özetle, sıcaklık ve yağış birlikte hareket etmektedir.Diğer bir deyişle soğuk geçen kışları hep kuraklık takip etmektedir. Örneğin 1992 kışı son 60 yılın en soğuk kışı olurken 1971 en soğuk ikinci kışı ve 2008 kışı da en soğuk üçüncü kış olmuştur. Ve gerek dünya ve gerekse Türkiye, ortalamaların altında soğuk geçen bu yıllarda çok ciddi ekonomik zorluklar da yaşamışlardır. Örneğin 1992 yılında soğuklarla birlikte gelen kuraklık nedeni tüm barajlarımız boşalmış ve Türkiye tarihinde ilk kez Bulgaristan'dan elektrik ithal etmek zorunda kalmıştır. Dünyadan bir örnek vermek gerekirse ABD 1992 kuraklığında tuvalet rezervuarlarını 1,5 litre küçültmüş

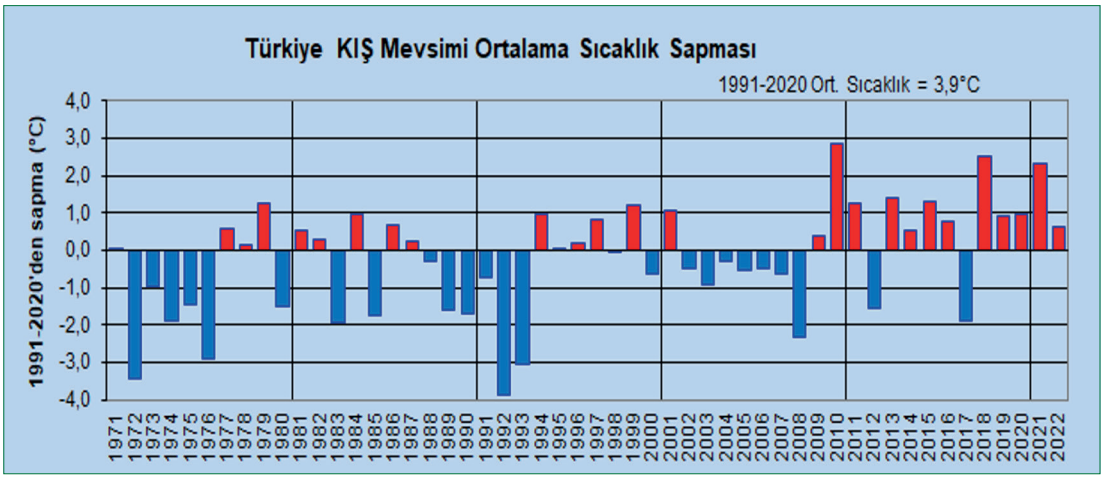
ve su kullanımına yönelik çok sert tedbirler almıştır. Kanada ise balık stoklarını koruma adına Atlantik'te balıkçılığı 2 yıl süre ile yasaklamıştı. Son 60 yılda üçüncü soğuk kışın yaşandığı 2008 yılında ise dünya gıda indeksi tüm zamanların rekorunu kırarken petrol de 170 dolarlara fırlamıştır. Aynı şekilde 2008 yılında da kömür fiyatları da 192 dolarlara kadar çıkmıştır. MGM verilerine göre 2022 yılı Ocak ayı Türkiye ortalmalarının 0,7 derece ve Mart ayının da 3,7 derece daha soğuk geçmesi şu an yaşadığımız ekonomik krizin ana nedeni olan kuraklığın temelini oluşturmuştur.



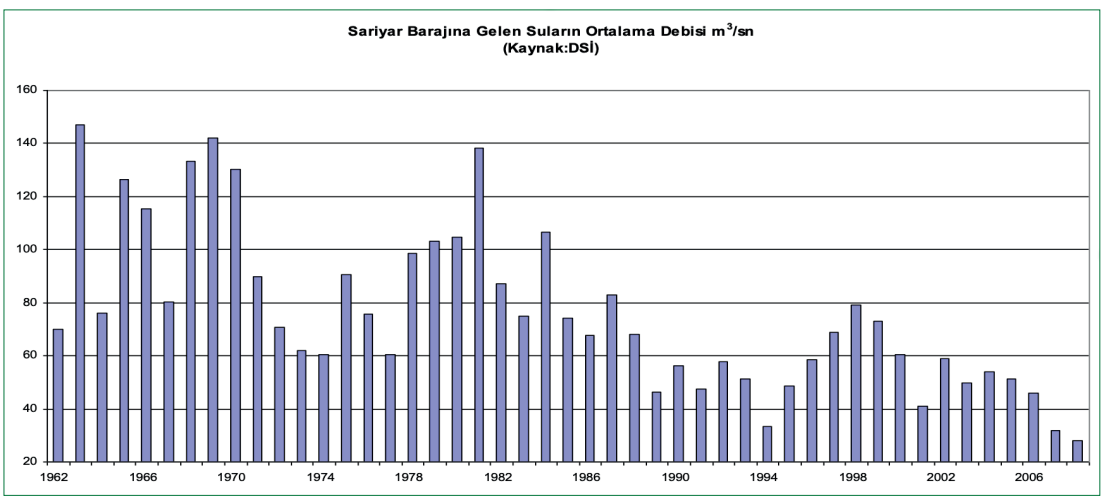

***Şekil 3.*** *Denizli örneğinde kış sıcaklıkları ($^0C$) ile yağış ($mm/m^2$) ilişkisi. (MGM, 2006)*

## 4. İklimsel Değişimler ile Suyun İlişkisi

Türkiye'de yağışların artışına rağmen suların azalmasına neden olan faktörleri açıklamak için herhangi bir barajın su seviyesi değişimi ya da debilerini incelemek yeterlidir (Akış, 2007). Buna örnek olarak Sarıyar barajına 1962-2008 yıllarında gelen sudaki debi değişimleri incelenmiştir (Şekil 5). Debilerin 1960,1980 ve 2000'li yıllardaki kış aylarındaki ısınma (Şekil 4) ve dolayısı ile yağışların artma nedeni ile arttığı ancak 1970, 1990 ve 2008'li yıllardaki soğuk geçen kışlar nedeni ile ise azaldığı görülür (Şekil 4). Ancak 1960 yılından sonra sürekli olarak debilerin düşme nedeni iklimler değil, nüfusun 27 milyondan 70 milyonlara (2008), sulanabilir tarım alanının 1,3 milyon hektardan 6 milyon hektarlara, ayrıca su kullanan sanayinin de oldukça artması ile ilgidir.




***Şekil 4.*** *Türkiye 1971-2022 kış sıcaklıkları grafiği. Son 60 yılın en soğuk yılı 1992 kışıdır. İkincisi, 1972 ve üçüncüsü de 2008 kışıdır. Her üçünde de Türkiye ciddi su ve ekonomi krizine girmiştir. (URL 3)*




***Şekil 5.*** *Sarıyar barajına 1962-2008 yılları arasında gelen sudaki debi değişimleri*

Birleşmiş Milletler verilerine göre dünya nüfusu her 45 yılda bir %100 artmaktadır. Bu nüfus artışı bizim ülkemizde ise %200'leri geçmektedir. Türkiye'nin 1960'lardaki nüfusu 27 milyon iken günümüzde bu rakam 85 milyonu geçmiştir. Tüm bu nüfus artışı daha çok su, daha çok gıda ve daha çok enerji anlamına gelmektedir. Türkiye'nin yıllık su potansiyelinin, DSİ tarafından 112 milyar metreküp olduğu belirtilmektedir. Eğer bunu nüfusa bölersek 1960 yıllarında kişi başı su potansiyelimizin 4 bin metreküpten fazla olduğu görülür. Ancak günümüzdeki nüfus artışı nedeni ile söz konusu bu rakamın 1300 metreküplere düştüğü yani su fakiri ülkeler sınırına doğru gerilediğimiz ortaya çıkar. Küresel ısınma döneminde olmamız nedeni ile dünyada yağışlar ortalama olarak her bir derece sıcaklık artışında %2 gibi artmaktadır. Ancak yağışlardaki artış, nüfus artışından kaynaklanan su gereksinimini karşılamaktan çok uzaktır.

Bu nedenle Türkiye artık suyunu çok dikkatli kullanmak zorundadır. Örneğin gelişmiş ülkelerde suyun %40 civarı tarımda kullanırken Türkiye'de Tarım ve Orman Bakanlığı'nın hazırladığı "2019-2023 Ulusal Su Planında" bu oran %74'dür. Yine bu planda suyun %13'nün sanayi ve diğer %13'nün de evsel ihtiyaçlar için kullanıldığı belirtilmektedir.

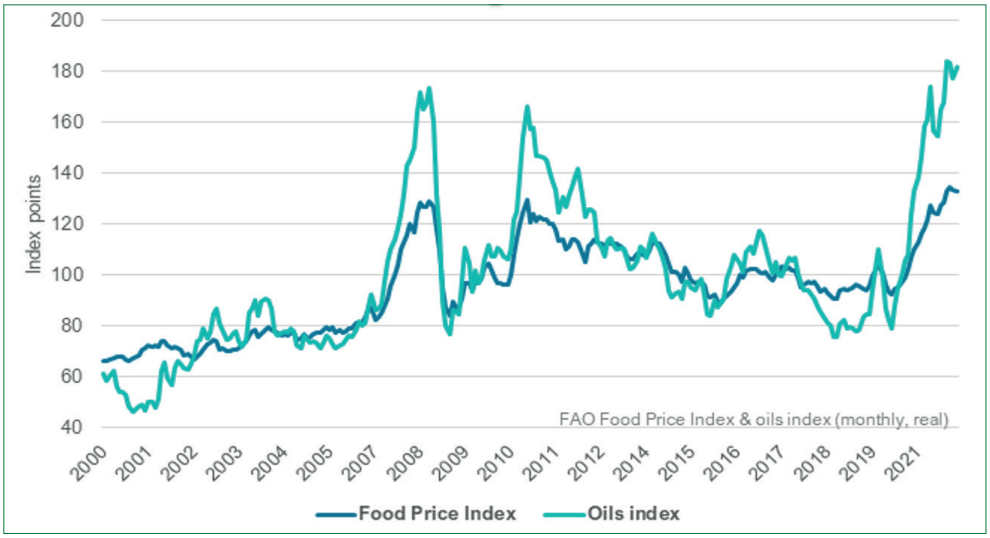
Türkiye'nin aşırı nüfus artışının yanısıra, 1960'lı yıllarda sulanabilir tarım arazisi 1,3 milyon hektar iken günümüzde bu alan 6 milyon hektarlara çıkmıştır. Ancak ülkemizde hala vahşi sulamada ısrar edilmesinin yanısıra, az yağış alan ve su sorunu olan bölgelere ısrarla çok su isteyen bitkilerin dikilmesi nedeni ile aşırı bir yeraltı suyu çekimi yapılmaktadır. Yeraltından aşırı su çekimi nedeni ile son yıllarda 50'den fazla gölün ve sulak alanın kuruduğu bilinen bir gerçektir. Yani bu göllerin ya da sulak alanların kuruma nedeni iklimler değil yanlış tarım politikaları ile yanlış su kullanımında ısrar edilmesidir.

Örneğin; Türkiye'de her geçen yıl özellikle göller bölgesinde elma üretimi artmaktadır. Bir kilo elma alabilmek için her gün ağaca bir litre su verilir. Yani 2021 yılında 4,3 milyon ton elma üreten Türkiye'de, her gün yaklaşık 4,3 milyon metreküp elma ağaçlarına verilmiş demektir. Söz konusu bu suyun miktarı İstanbul, İzmir ve Ankara'ya verilen günlük su miktarına yakındır. Ve elmaya verilen bu suyun çok büyük kısmı yeraltından karşılanmaktadır. Yeraltındaki akiferlerin destekleyicisi olan göller ve sulak alanlar bu aşırı çekim karşısında yetersiz kalmakta ve maalesef kurumaktadır. Göller bölgesindeki göllerin kuruma ya da kuruma tehlikesinde olma nedeni bu kontrolsüz yeraltı su çekimleridir. Bu durum Ergene Havzası, Menderes Ovaları, Gediz Ovası gibi birçok havzada maalesef bilinçsiz tarım ürün desenlerinin seçilmesi ve bu nedenle aşırı yeraltı su çekimleri nedeni ile yaşanmaktadır. Ayrıca Ergene Havzasında olduğu gibi 2000'den fazla sanayi sürekli yeraltından su çekmekte ve kirleterek Ergene'ye vermektedirler. Bu tür su kullanan sanayilerin, aynı zamanda tarımı da olumsuz yönde etkilemesi nedeni ile, suyun bol olduğu yerlerde yani doğuda olması gereklidir. Özetle yaşadığımız su krizinin altında iklimler değil yanlış tarım ürün desenleri ile vahşi sulamanın yanısıra yanlış bölgelere kurulan sanayi yatmaktadır.

## 5. İklimsel Değişimlerin Enerji ve Gıda ile Olan İlişkisi

Dünyanın önemli ana enerji kaynaklarından biri de Hidroelektrik santralleridir. Örneğin Türkiye'de yıllık enerji üretiminin ortalama %26'sı HES'lerden sağlanır. Ancak Türkiye kuraklık yıllarında baraj seviyelerinin düşmesi nedeni ile oluşan enerji açığını fosil yakıtlarla kapatmak zorunda kalır. Bunu yalnız Türkiye değil, tüm dünya ülkeleri de kurak dönemlerde, barajlardaki su seviyelerinin düşmesi nedeni ile oluşan enerji açıklarını fosil yakıtlar ile kapatır. Bu nedenle kurak geçen yıllarda dünyada petrol, doğalgaz ve kömür fiyatları bir anda yükselir. Örneğin, son 60 yılın en soğuk kışının dolayısı ile en sert kuraklığın yaşandığı 1992 yılında barajlarımız boşalmış ve Türkiye tarihinde ilk kez Bulgaristan'dan elektrik ithal etmek zorunda kalmıştır. Bundan sonraki en soğuk kış ise son 60 yılın da en soğuk üçüncü kışı olan 2008 yılında yaşanmıştır (Şekil 4). Ve bu kuraklık nedeni ile 2008 yılında gerek dünya gıda indeksi ve gerekse petrol indeksi rekorlar kırmıştır (Şekil 6). Geçtiğimiz 2021 Mart ayı sıcaklığının Türkiye ortalamalarının 0,7 derece altında gerçekleşmesi, yağışların azalmasına yani kuraklığa

neden olmuştur. Oluşan bu kuraklık önce tarımsal kuraklığa neden olmuş ve dünya gıda indeksi yükselişe geçmiştir. HES barajlarımızdaki üretim %26'lardan %10'lara kadar gerilemesi nedeni ile de oluşan bu enerji açığını fosil yakıtlarla kapatmak zorunda kalmıştık. Tüm dünya ülkeleri de kuraklık nedeni ile HES'lerindeki enerji kaybını fosil yakıtlarla karşılamaya gidince fosil yakıt fiyatları hızla yükselişe geçmiştir. Ve Dünya gıda indeksi tüm zamanların rekorunu kırarken, 2021 Ocak ayında 25 dolar olan petrol fiyatları dörde katlanarak 100 dolarlara çıkmış, kömür fiyatları 60 dolardan 400 dolara ve doğalgaz fiyatları da 120'den 1400 dolarlarara fırlamıştır. Bu aşırı artışlarda Şubat ayında başlayan Rusya Ukrayna çatışması da rol oynuyor ancak söz konusu bu fiyat artışları savaştan bir yıl önce 2021 Mayıs ayında başlamıştır. Örneğin Haziran 2021'de petrol 114 dolara, kömür 200 dolara, doğalgaz da 2021 sonunda 1400 dolarara yükselmiştir.

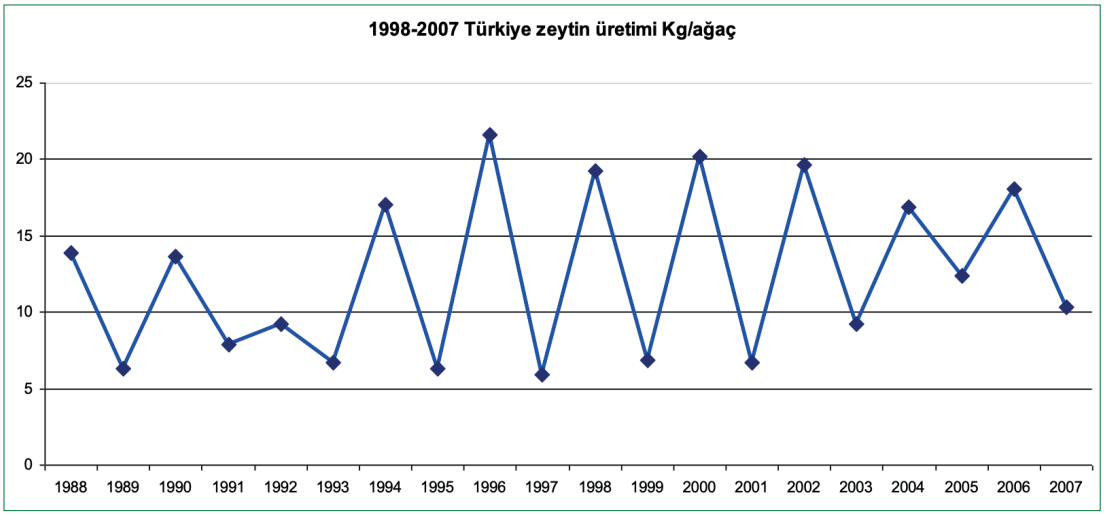



***Şekil 6:*** *Dünya gıda ve petrol indeksi. 2008 ve günümüze dikkat. 2011 yılındaki fiyat artışları Arap Baharı nedeni iledir. (URL 4)*

## 6. İklimsel Değişimler ve Tarım Ürünleri Verimlilik Değişimleri

İklimsel değişimler tüm tarım ürünleri üzerinde etkilidirler. Buna örnek olmak üzere, iklimsel değişimlerin Türkiye zeytin üretimi üzerine etkileri anlatılacaktır (Şekil 7). Dünyada 1990'lı yıllara doğru hava sıcaklıklarının düşmesi ile birlikte ülkemizde zeytinde ağaç başı üretim oratalama olarak 8,5 kilo civarında düşmüştür. Ancak 1991 Haziran ayında son 130 yılın en büyük patlamalarından birini gerçekleştiren ve atmosfere 20 milyon ton gibi sülfür gazı bırakan Pinatubo yanardağı dünya sıcaklığını 0,5 derece düşürmüş ve tüm dünyada müthiş bir kuraklığa neden olmuştur (Reilly, 2009). Bu soğuma sonucu 1992 yılında başta zeytin olmak üzere tarım ürünlerinde çok büyük verimlilik düşüşleri gerçekleşmiştir (Şekil 7). Ayrıca bu kuraklık sonucu barajların boşalması nedeni ile ilk kez Bulgaristan'dan elektrik satın almak zorunda kalınmış, ABD su tasarrufu için tuvalet rezervuarlarını 1,5 litre küçültmüş ve Kanada Atlantik Okyanusunda, balık stoklarını korumak için balıkçılığı yasaklamıştır.

Türkiye'deki zeytin üretimi 1990'lı yıllardaki soğuma nedeni ile azalmaya başlamış, 2000'li yıllardaki ısınma ile birlikte yeniden yükselişe geçmiş ve 2004'lü yıllardan sıcaklığın düşme eğilimi birlikte yeniden düşüşe geçmiştir. Zeytindeki bu azalış ve artış başta muz olmak üzere elma vs. gibi ağaçsı ürünlerde de gözlenmektedir (Yıldız & Yaşar, 2009).

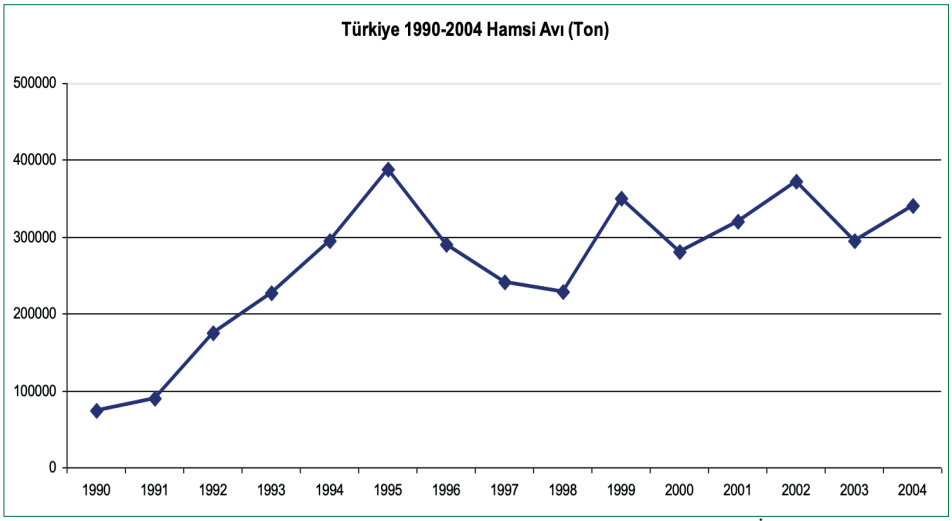



***Şekil 7.*** *Türkiye 1988-2007 yılları arasındaki zeytin üretimi. Zeytindeki 1992 yılında aşırı düşüş, Pinatubo volkanının patlaması nedeni ile ortalama sıcaklıkların 0,5 derece daha düştüğü yıldır. (TUİK, 2008)*

Özetle iklimlerde tarımı etkileyen ana parametre soğuma ve ısınma nedeni ile değişen yağışlardır. Atmosferin soğuması ile birlikte gerek düşen hava sıcaklıkları ve gerekse azalan yağışlar tarımda çok ciddi verimlilik azalmasına neden olmaktadır. Yine günümüzde dünya gıda indeksinin tüm zamanlarının rekorlarını kırarak tavan yapmasının nedeni gerek 2021 ve gerekse 2022 Mart ayının çok şiddetli soğuması nedeni ile oluşan kuraklıktır.

## 7. İklimsel Değişimler ve Balıkçılık

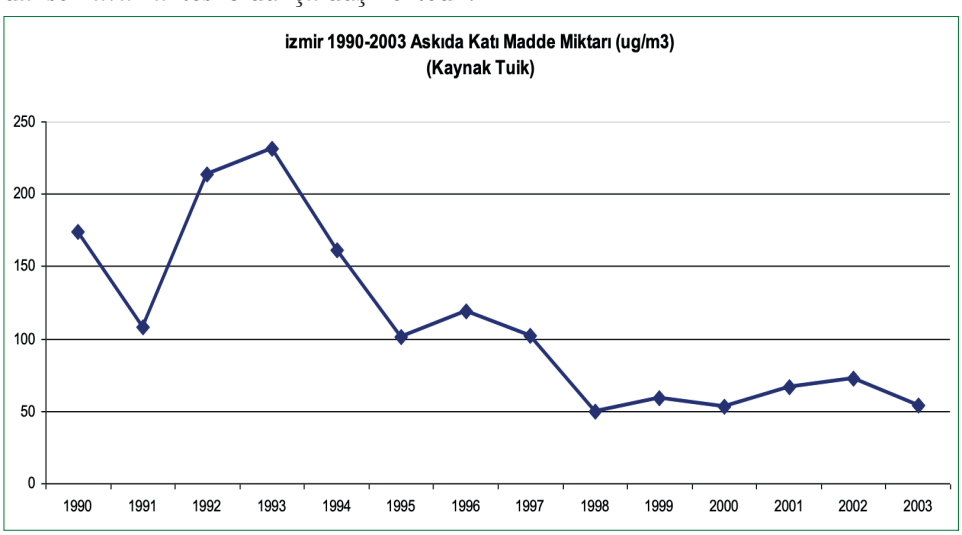
İklimsel değişimler balıkçılık sektöründe de oldukça etkindir. Tıpkı tarım ürünlerinde olduğu gibi sıcak ve yağışlı geçen yıllarda balık avı oldukça artarken, soğuyan ve dolayısı ile kurak geçen yıllarda da azalmaktadır. Bunun nedeni yağışla birlikte gerek atmosferden ve gerekse akarsulardan gelen nütrient miktarlarındaki değişimdir. Denizlerdeki fitoplanktonların besin kaynağı olan bu nütrientler denizlerdeki birincil üretimi artırır, ki zaten birincil üretimin formülü nütrient ve sıcaklık artışıdır. Bu artış da doğrudan balık popülasyonun artmasına neden olur. Özetle sıcaklık artışına bağlı olarak artan yağış denizlerdeki balık popülasyonunda da artışlara neden olmasından dolayı ılık geçen yıllarda balık avı oldukça artmaktadır (Şekil 8). Örneğin Kanada, 1991 yılında son 130 yılın en büyük patlamasını gerçekleştiren Pinatubo yanardağının soğumaya neden olacağını ve bunun da denizlerindeki balık populasyonu düşüreceğini öngörerek Atlantik'te iki yıl boyunca balıkçılığı yasaklamıştır.



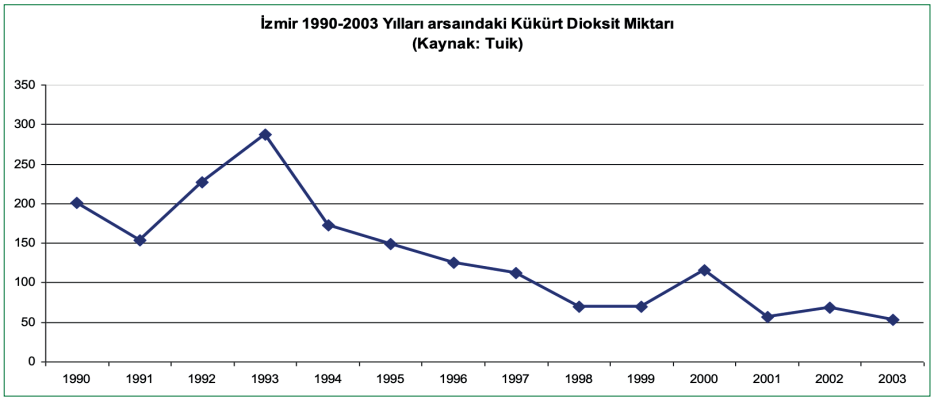

***Şekil 8.*** *Türkiye 1990-2004 yılları arasındaki hamsi avı (TUİK, 2005).*

## 8. İklimsel Değişimler ve Hava Kalitesi İlişkisi.

İklimsel değişimlerin hava kalitesi ile olan ilişkisini açıklamak için İzmir'de ölçülen askıda katı madde ve kükürt dioksit miktarları kullanılmıştır. Son 60 yılın en soğuk yılları olan 1990'lı yılların başında askıda katı maddenin ve kükürt dioksitin çok yüksek olduğu görülebilir. Özellikle Pinatubo yanardağının patlaması ile hava sıcaklığının 0,5 derece düştüğü bu yıllarda yağışlar çok düşmüştür. Kuraklık nedeni hava sıcaklığı ile ters ilişkide olduğu Şekil 9'da görülebilir. Ve Şekil 10'da görüldüğü gibi havadaki Kükürt Dioksit oranının da tıpkı askıda katı maddede olduğu gibi sıcaklıkla ters orantıda olduğu görülebilir (Güngör & Sevindirir, 2013). Diğer bir deyişle hava sıcaklığının ve yağışların arttığı yıllarda hava çok daha temiz hale gelmekte soğuma yıllarında ise hava kalitesi oldukça düşmektedir.




***Şekil 9.*** *İzmir 1990-2003 yılları Askıda Katı madde Miktarı(ug/m$^3$) (TUİK, 2004)*




***Şekil 10.*** *İzmir 1990-2003 yılları Askıda Katı Madde Miktarı(ug/m$^3$) (TUİK, 2004)*

## 9. Sonuç

İklimler sürekli olarak ısınma ve soğuma döngüleri halinde hareket eden doğa olaylarıdır. Bu ısınma soğuma döngüleri sonucu oluşan iklim değişiklikleri ise başta su olmak üzere, tarım, balıkçılık ve enerji konularında insan yaşamını doğrudan pozitif ya da negatif yönde etkilerler. Gerçek verilerin incelendiği bu makalede ısınma dönemlerinde verimliliğin arttığı soğuma dönemlerinde ise azaldığı ve soğuma dönemlerinin insan yaşamını hep negatif yönde etkilediği görülmektedir. İklimsel değişimler bir ülkenin su, tarım, balıkçılık ve enerji politikalarının temel verilerini doğrudan kontrol eden parametrelerdir. Bu nedenle iklimsel değişimlere her zaman hazır olmak zorundayız. Çünkü tarihe baktığımızda dünyada son 4700 yılda çıkan 15 bin civarında savaş ve büyük göçlerin temelinde, her ne kadar son yüzyılda bunlara enerji savaşları eklense de, hep soğuma sonucu oluşan su ve gıda krizi olduğunu görürüz. Ancak dünyamızda çok daha büyük kuraklığa neden olabilecek doğa olayları vardır. Örneğin bugün bir mega yanardağ ya da büyük meteor düşmesi sonucu dünyamız bir anda buzul dönemine yani çok uzun yıllar sürecek kuraklık ve susuzluk dönemine girebilir İşte tüm bu nedenlerden dolayı iklimsel değişimlere başta tarım ve enerji olmak üzere her zaman hazır olmak zorundayız. Tüm bu değişimleri avantaja dönüştürebilmek için yapılması gerekenler aşağıda sıralanmıştır.

1- Tarım için gerekli suların barajlardan tarlalara kapalı sistemle ulaştırılması ve tarlalarda damlama/yağmurlama sulama sistemine geçilmesi gerekir. Çünkü gelişmiş ülkelerde suyun %40'ı tarımda kullanılırken Türkiye'de bu oran vahşi sulama nedeni ile %74 gibi devasa boyutlardadır. Vahşi sulama aynı zamanda verimli tarım topraklarında erozyona neden olmaktadır.
2. Yeraltı suları kesinlikle kontrol altına alınmalı ve zorunlu haller dışında en üst akiferden su kullanımına izin verilmelidir.
3. Tarım ürün desenleri, iklimsel değişimlere göre, devlet tarafından belirlenmelidir.
4. Su kullanan sanayi, tarım alanları dışındaki suyun bol olduğu bölgelere yönlendirilmelidir.
5. Yeraltı barajlarının yapımı planlanmalıdır.
6. Şehirlerde kanalizasyon sistemleri ile yağmur suyu sistemleri ayrılmalı ve toplanan yağmur suları yeniden barajlara ya da yapılacak olan göletlere yönlendirilmelidir.

7. Arıtma tesislerinde arıtılan sular tarımda kullanılmalıdır.
8. Şehir şebekelerinde kayıp kaçak oranları düşürülmeli ve sular çok daha dikkatli kullanılmalıdır. Örneğin ABD, Pinatubo yanardağının patlaması sonucu sıcaklığın 0,5 derece gibi düşmesi nedeni ile artan 1992 kuraklığında rezervuarlarını 1,5 litre kadar küçültmüştür.

## 10. Kaynaklar / References


Akış, A., (2007). İklim Değişikliklerinin İzmir Barajları Üzerindeki Etkileri ve Sonuçları. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi. 63s.

Çetin, T, (2016) . İklim Değişikliklerinin Su Kaynaklarına Etkisi. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 80s.

DİE, Devlet İstatistik Enstitüsü. Tarım İstatistikleri Özeti(2002), Ankara, Türkiye

Güngör, A., & Sevindirir, C.,H., (2013). Isparta İlindeki Atmosferde Bulunan Kükürt dioksit (SO2) ve Partikül Madde (PM) Konsantrasyonunun Çoklu Doğrusal Regresyon Yöntemi İle Modellenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(1), 95-108.

Hay, W.W., (1996). Tectonics and climate. *Geol Rundsch*, 85, 409–437. ttps://doi.org/10.1007/BF02369000

Kenneth J, (1982) Marine Geology. Prentice-Hall, C.W.Montgomery. ISBN 0-13-556936-2

Malin, G.; Turner, S. M.; Liss, P. S. (1992). "Sulfur: The plankton/climate connection". *Journal of Phycology*. 28(5), 590–597. doi:10.1111/j.0022-3646.1992.00590.x. S2CID 86179536.

MGM 2006, Veriler meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden 2006 yılında satın alınmıştır.

Reilly, Benjamin (2009). Disaster and human history: case studies in nature, society and catastrophe. McFarland. ISBN 978-0-7864-3655-2.

Thurman, V.H., Introduction to Oceanography, Merril Publishing Company.1988. ISBN: 0-675-208556-01

TUİK, 2004, Türkiye Hava İstatistikleri. Meteoroloji Genel Müdürlüğü.

TUİK, 2005, Türkiye Su Ürünleri İstatistikleri. Tarım ve Orman Bakanlığı.

TUİK 2008, Türkiye Tarım İstatistikleri. Tarım ve Orman Bakanlığı.

Van Oldenborgh, G. J., & G. Burgers (2005), Searching for decadal variations in ENSO precipitation teleconnections, Geophys. Res. Lett., 32, L15701, doi:10.1029/2005GL023110.

Yaşar, D., (1994). Late Glacial - Holocen Evolution of the Aeagean Sea. Dokuz Eylül University, Institute of Marine Sciences and Techhnology, Ph.D thesis, Izmir, 329 pp. (Unpublished)

Yaşar, D., Adalıoğlu S. & Esen E., (2008). İklimlerin Değişim Nedenleri ve Üretim Üzerine Etkileri. (Ed. Lale Balas) s: 1023-1029.

Yıldız, D., Yaşar D., (2009). Küresel Isıtılan Dünya ve Su. Truva Yayınları. 160s.

URL-1 https://mgm.gov.tr/FILES/resmi-istatistikler/parametreAnalizi/2022-ortalama-sicaklik.pdf

URL-2 https://mgm.gov.tr/FILES/resmi-istatistikler/parametreAnalizi/2022-yagis.pdf

URL-3 https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/yillikiklim/2022/mevsimlik-sicaklikanalizi-2022-kis.pdf

URL-4 https://www.mckeany-flavell.com/real-food-price-index-down-half-a-percent-at-start-of-2022-02-10-22

## Yazar Hakkında / About Author

**Prof. Dr. Doğan YAŞAR | Dokuz Eylül Üniversitesi |**
**dogan.yasar[at]deu.edu.tr | ORCID: 0000-0001-7571-8955**
Lisans eğitimini Dokuz Eylül Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümünde tamamlayarak Yüksek Lisans ve Doktora çalışmalarını "Oşinografi"alanında yapmıştır. Bilimsel 36 makalesi ve 2140 atıfı olup h indeksi 18, i-10 indeksi ise 20'dir. Bugüne değin Tubitak, Uluslarası, BAP projeleri ve Döner Sermaye kapsamında 100'den fazla projede görev almıştır. Oşinografin temel öğesi olan İklimsel değişimlerin nedenleri ile bu değişimlerin su, tarım, balıkçılık ve enerji üzerindeki etkileri ile deniz kirliliği konusunda 300 civarında Tv ve radyo programı ile 150'den fazla konferansı bulunmaktadır. Ayrıca Dursun Yıldız ile birlikte yazdıkları "Küresel Isıtılan Dünya ve Su" ile "Doğu Akdenizde Küresel Satranç" isimli iki kitabı vardır. Halen Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü'nde "Çevresel Yerbilimleri Bölümünün" Anabilim Dalı Başkanlığını yürütmektedir.

**Prof. Dr. Doğan YAŞAR | Dokuz Eylül University |**
**dogan.yasar[at]deu.edu.tr | ORCID: 0000-0001-7571-8955**
He completed his undergraduate education at Dokuz Eylül University, Department of Geological Engineering and completed his Master's and Doctorate studies in the field of "Oceanography". He has 36 scientific articles and 2140 citations, with an h index of 18 and an i-10 index of 20. To date, he has taken part in more than 100 projects within the scope of Tubitak, International, BAP projects and Revolving Funds. He has about 300 TV and radio programs and more than 150 conferences on the causes of climatic changes, which are the basic elements of oceanography, and the effects of these changes on water, agriculture, fisheries and energy, and marine pollution. He also has two books, "Küresel Istılan Dünya ve Su" and "Doğu Akdenizde Küresel Satranç", which he wrote with Dursun Yıldız. He is currently the Head of the Department of "Environmental Earth Sciences" at Dokuz Eylul University, Institute of Science and Technology.

# TÜRKİYE HES POTANSİYELİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLERİ

# HYDRAULIC POWER POTENTIAL OF TÜRKİYE AND CLIMATE CHANGE IMPACTS

*Z. Fuat TOPRAK*

DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch13

# TÜRKİYE HES POTANSİYELİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLERİ

***Z. Fuat TOPRAK***
*Dicle Üniversitesi*

**Özet**

Küresel boyuttaki nüfus artışına bağlı olarak enerji talebi artmaktadır. Gelişim yönünde değişen teknolojiye ve refah düzeyine bağlı olarak ihtiyaçlar çeşitlenerek artmaktadır. Bu ihtiyaçlar ise enerji tüketiminde çeşitlenmeye ve artışa neden olmaktadır. Dolayısıyla gün geçtikçe kişi başına düşen enerji tüketimi artmaktadır. Buna bağlı olarak araştırmacılar yeni enerji kaynaklarını araştırmaya ve keşfetmeye devam etmektedir. Bu arayış, daha çok ucuz, sürdürülebilir ve yenilenebilir temiz enerji kaynaklarının bulunması yönündedir. Bunun sonucu olarak güneş enerjisi sistemleri, rüzgâr, dalga, jeotermal, hidrojen, biokütle ve hidrolik enerji üretim sistemleri gelişmiştir. Bu çalışmada Türkiye'nin hidroelektrik santral (HES ) potansiyeli ve iklim değişikliğinin bu potansiyel üzerindeki etkisine yer verilmiştir. Henüz teknik ve ekonomik olarak değerlendirilebilir hidrolik enerji potansiyelimizin tamamı işletmeye açılamamıştır. Bununla birlikte teorik (brüt) potansiyel hidrolik enerjimizin tamamı işletmeye açılsa bile ki bu uygulamada mümkün değildir, 2040 yılı talep projeksiyonlarına göre toplam enerji talebimizin ancak %68,1'i karşılanabilmektedir. Mevcut potansiyel üzerindeki iklim değişikliğinin olumsuz yöndeki etkisi de dikkate alınırsa, teknik ve ekonomik olarak değerlendirilebilir tüm potansiyelimizin bir an önce işletmeye açılması gerekir. Bu bağlamda küçük HES'lerin önündeki mevzuat engellerinin kaldırılması, GAP'ın bir an önce tüm bileşenleri ile tamamlanması ve özellikle dağlık bölgelerde küçük HES'ler ile üretilen elektrik enerjisinin enterkonnekte şebekeden bağımsız olarak yerinde tüketiminin kolaylaştırılmasının bir zorunluluk haline geldiği söylenebilir.

***Anahtar Kelimeler***
*Enerji, Yenilenebilir enerji, Hidrolik enerji, Türkiye, İklim değişikliği, HES*

# HYDRAULIC POWER POTENTIAL OF TÜRKİYE AND CLIMATE CHANGE IMPACTS

***Z. Fuat TOPRAK***
*Dicle University*

**Abstract**

Due to the global population growth, energy demand is increasing. Depending on the development in technology and welfare level, the needs increase and diversifies. These needs cause diversification and increase in energy consumption. Therefore, the energy consumption per person increases day by day. Accordingly, researchers research and discover new energy sources. This search is mostly towards finding cheap, sustainable and renewable clean energy sources. As a result, solar energy, wind, wave, geothermal, hydrogen, biomass and hydraulic energy production systems have developed. This study presents Türkiye's hydro electric power plant (HEPP ) potential and the impact of climate change on this potential. The hydraulic energy of Türkiye, which technically and economically can be evaluated, has not been put into operation yet. However, even if all of our theoretical (gross) potential hydraulic energy is put into operation, which is not possible in practice, only 68.1%of our total energy demand can be met according to 2040 demand projections. Considering the negative impact of climate change on the existing potential, all of our technical and economically viable potential should be put into operation as soon as possible. In this context, it can be said that it has become a necessity to remove the legislative obstacles in front of small HEPPs, to complete the GAP with all its components as soon as possible, and to facilitate the on-site consumption of electrical energy produced by small HEPPs, especially in mountainous regions, independently of the interconnected grid.

***Keywords***
*Energy, Renewable energy, Hydraulic energy, Türkiye, Climate change, HEPP*

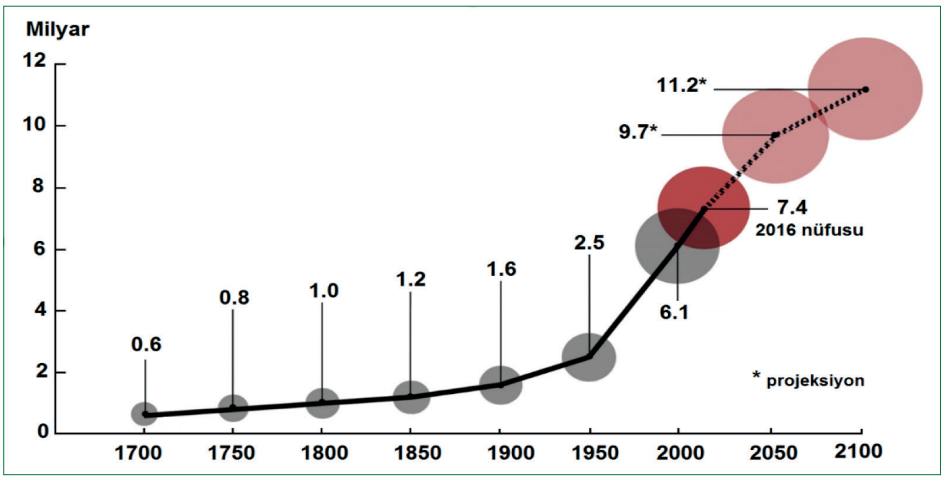
## 1. Giriş

Bilindiği üzere hidrolik enerji suyun potansiyel enerjisinin önce kinetik, akabinde mekanik ve neticede ise elektrik enerjisine dönüştürülmesi ile elde edilmektedir. Bu mekanizmaya en kolay imkân veren su kaynakları ise akarsulardır. Oysa küresel boyutta etkisini sürdüren iklim değişikliğinin olumsuz yönde en çok etkilediği tabii kaynakların başında ise su kaynakları gelmektedir. Yine çok iyi bilindiği gibi gerek yağışların gerek yeraltı ve yerüstü su kütlelerinin yeryüzündeki dağılımı konumsal ve zamansal açıdan homojen değildir. İklim değişikliği bu heterojenliği daha da artırmaktadır. Halihazırda sıcaklık artışı (küresel ısınma) şeklinde kendini gösteren iklim değişikliği aynı zamanda buzul ve kar kütleleri şeklinde olan tatlı su kaynaklarının eriyerek denizlere akmasına ve tuzlu suya dönüşerek doğrudan kullanılamayacak hale gelmesine neden olmaktadır. Diğer taraftan, akarsu ve göllerdeki suyun daha fazla buharlaşmasına ve kolayca yararlandığımız sıvı haldeki suyun gaz haline dönüşmesine ve doğrudan kullanılamayacak hale gelmesine neden olmaktadır. Bunun yanı sıra iklim değişikliği nedeniyle, kıştan artan nem (KAN) olarak bilinen bitkinin doğrudan kullandığı sığ toprak nemi gittikçe daha derinlere inmektedir. Dolayısıyla bitki kök bölgesi kuru kalmakta ve sulama suyuna daha çok ihtiyaç olmaktadır. Ayrıca su ihtiyacı için (özellikle sulu tarım için) yeraltı suyunu gittikçe daha derinlerden yeryüzüne çıkarma mecburiyeti hasıl olmaktadır. Bu da enerji tüketimini gittikçe artırmaktadır. Temiz ve çevre ile barışık, yenilenebilir ve ham madde tüketmeyen enerji kaynaklarının başında ise hidrolik enerji gelmektedir. Düzenli hidrolik enerji üretimi için yapılan baraj haznelerinin çok büyük alanları kaplaması, geniş çapta çevreyi, tarihi ve kültürel varlıkları ve sosyal hayatı etkilemeleri nedeniyle kamu ve özel müteşebbis günümüzde biriktirmesiz hidroelektrik santrallere (HES) yönelmiştir. Ülkemizin gerek biriktirmeli gerek biriktirmesiz hidrolik enerji potansiyeli olmakla birlikte iklim değişikliği nedeniyle bu potansiyel ciddi risk altındadır. Bu çalışmada, Türkiye HES potansiyeli ve iklim değişikliği etkileri ele alınmıştır. Bu amaçla öncelikle genel olarak enerji talebinin neden arttığı vurgulanmıştır. Bu vurgu, "Nüfus Artışının Hidrolik Enerji Üzerindeki Etkisi", "Teknolojik Gelişme ve Refah Düzeyinin Hidrolik Enerji Üzerindeki Etkisi", "Su Talebindeki Artışın Hidrolik Enerji Üzerindeki Etkisi" ve "Küresel İklim Değişikliğinin Hidrolik Enerji Üzerindeki Etkisi" başlıkları altında yapılmıştır. Ardından, dünyada ve ülkemizdeki enerji arz/talep dengesi ve hidrolik enerjinin diğer enerji kaynakları içerisindeki yeri ve geleceğine değinilmiştir. Sonuç olarak alınması gereken tedbirler önerilmiştir.

## 2. Nüfus Artışının Hidrolik Enerji Üzerindeki Etkisi

Dünya nüfusu hızla artmaktadır. Şekil 1'de geçmişten günümüze (1700 – 2022) gerçekleşen nüfus artışı ve geleceğe yönelik nüfus artış tahminleri verilmiştir. Toprak (2022), 2000 yılından itibaren nüfus artış hızında bir azalma olmakla birlikte bu durumun, dünya nüfusunun azalacağı anlamına gelmediğini ifade etmektedir. Bilindiği üzere günümüzde insan faaliyetlerinin neredeyse tamamı enerji tüketerek gerçekleşmektedir. Bir kısım faaliyetler doğrudan tüketime, bir kısmı ise dolaylı tüketime neden olmaktadır. Dolayısıyla enerji tüketimini, 1) doğrudan tüketim, 2) dolaylı tüketim şeklinde ikiye ayırmak mümkündür.

Neticede her iki tüketim türü de nüfus artışından etkilenmektedir. Nüfus artıkça, hane sayısı; hane sayısı artıkça evsel elektrik tüketimi artmaktadır. Bu tür bir tüketim doğrudan tüketime örnek olarak verilebilir. Diğer taraftan nüfus artışına bağlı olarak gıda, giyim ve benzeri ihtiyaçlarda da tüketim artmaktadır. Bu ihtiyaçların üretilmesi için yine elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. Dolaylı enerji tüketimine ise bu tür tüketimler örnek olarak verilebilir. Zira, daha fazla gıda üretimi için sulama suyuna, sulama suyu temini için de enerjiye ihtiyaç duyulmaktadır. Dolayısıyla nüfus artışına bağlı olarak enerjiye olan ihtiyacı, enerjiye olan ihtiyaç ise hidrolik enerjiye yani HES'lere olan ihtiyacı artırmaktadır.

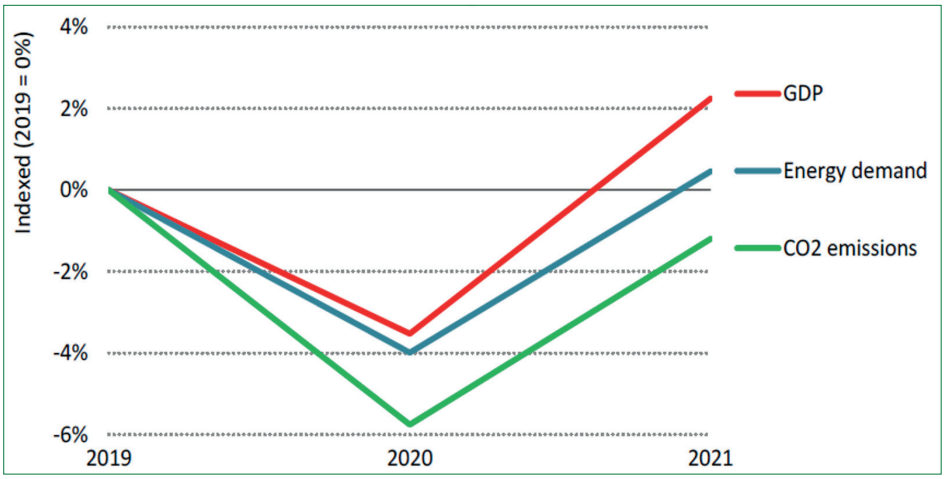



***Şekil 1.*** *Dünya nüfus artışı ve ileriye yönelik projeksiyonlar (Özgür, 2017)*

## 3. Teknolojik Gelişme ve Refah Düzeyinin Hidrolik Enerji Üzerindeki Etkisi

Enerjiye olan ihtiyaç, teknolojik gelişmelere ve refah düzeyinin artmasına bağlı olarak da artmaktadır. Zira teknolojideki ilerleme ve paralel olarak refah düzeyinde meydana gelen yükselme insan ihtiyaçlarında çeşitliliğin artmasına neden olmaktadır. Gerek nitelik gerek nicelik olarak insan ihtiyaçlarının artması daha fazla enerji ihtiyacını beraberinde getirmektedir. Bu da daha fazla hidrolik enerji yani daha fazla HES demektir.

Nitekim Şekil 2'de verilen grafik bu ilişkiyi çok çarpıcı bir şekilde göstermektedir. Şekil 2, 2019-2021 yani Covid 19 küresel pandemi yılları için gayri safi küresel hâsıla, enerji talebi ve karbon emisyonunun değişimini göstermektedir (URL-3, 2022). Bilindiği üzere Covid 19 yıllarında neredeyse sanayi ve teknoloji durma noktasına gelmiştir. Bunun yanı sıra yaşam kalitesi de ciddi bir şekilde düşmüştür. Grafiğe bakılırsa enerji talebinde de ciddi bir düşüş mevcuttur. Enerji tüketiminde düşüşü gösteren diğer bir parametre de aynı grafikte verilen karbon emisyonundaki düşüştür. Zira dünyada hala birincil enerji kaynakları fosil kaynaklardır. Şekilden görüldüğü üzere, gelişmişlik ve refah düzeyi enerji talebine, enerji talebi de karbon emisyonuna neden olmaktadır.




***Şekil 2.*** *2019-2021 yılları arası için küresel boyutta ortalama gayri safi yurtiçi hâsıla, enerji talebi ve karbon emisyonunun değişimi (URL-3,2022)*

## 4. Su Talebindeki Artışın Hidrolik Enerji Üzerindeki Etkisi

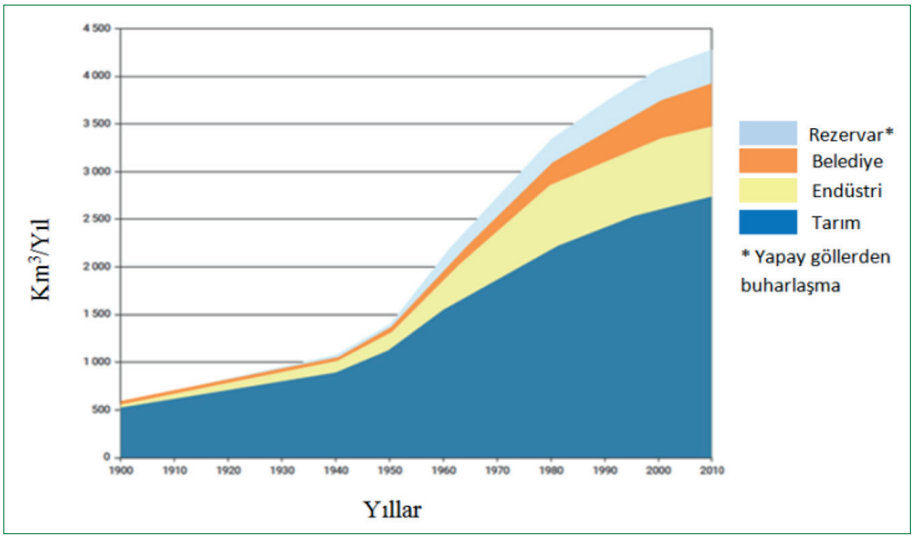
Küresel boyuttaki enerji talebinde meydana gelen artışın diğer bir nedeni de nüfusun, teknolojik gelişmelerin ve refah düzeyinin artmasına bağlı olarak içme-kullanma, sanayi ve sulama suyuna olan ihtiyacın artmasıdır. Loudière ve Gourbesville (2020), su talebindeki bu artışı, teknolojik yenilikler ve vatandaşların eğitim seviyesine bağlamaktadır. Yazarlar, Birleşmiş Milletler Dünya Su Geliştirme Raporunun (2020) Su ve İklim Değişikliği Bölümüne atıf ile 1900 yılından 2010 yılına kadar su tüketiminde sektörel bazda meydana gelen değişimi Şekil 4'teki grafik ile göstermektedir. Bu yazarların dışında çok sayıda araştırmacı nüfus artışına ve teknolojik ve refah düzeyindeki gelişmelere bağlı olarak gün geçtikçe suya olan ihtiyacın çeşitlenerek artacağını belirtmektedir (Karakaya ve Toprak, 2018; Toprak vd., 2018; Şevgin ve Toprak, 2021; Toprak, 2009; Toprak, 2016; Toprak vd., 2012; Songur vd., 2012). Dolayısıyla kişi başına düşen su tüketiminde de bir artış olacağını söylemek mümkündür. Bu nedenle dünyada çok sayıda bölgede su kıtlığının veya su stresinin yakın zamanda yaşanacağını tahmin etmek güç değildir. Artan su talebine bağlı olarak enerjiye olan ihtiyacın da artacağı açıktır. (şekil 3)

Su talebindeki artışın hidrolik enerji üzerindeki etkisini aşağıdaki gibi maddeler halinde özetlemek mümkündür:

Su talebi artınca;

- Su temini için daha fazla enerji tüketilmektedir. Bu da daha fazla hidrolik enerji talebi demektir.
- Suyu arıtmak için daha fazla enerji tüketilmektedir. Bu da daha fazla hidrolik enerji talebi demektir.

- Haznelerde su seviyesi düşünce biriktirmeli HES ile hidrolik enerji üretimi azalmaktadır
- Küçük akarsuların debisi düştüğünden biriktirmesiz HES ile hidrolik enerji üretimi azalmaktadır.




***Şekil 3.*** *Yıllara göre dünyada su tüketimi trendi (Loudière ve Gourbesville, 2020)*

## 5. Küresel İklim Değişikliğinin Hidrolik Enerji Üzerindeki Etkisi

Enerji üretim çeşitliliğini sınırlandıran ve dolayısıyla talebin karşılanabilmesini riske sokan diğer çok önemli bir husus da küresel boyuttaki iklim değişikliğidir. Sera etkisi olan gazların insan kaynaklı üretiminin küresel iklim değişikliğine neden olduğu Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) raporlarından anlaşılmaktadır (Toprak, 2013; Çelik ve Toprak, 2016; Kınık ve Toprak, 2016; Batan ve Toprak 2015; Toprak vd., 2009; Batan ve Toprak, 2017; Toprak, 2016; Toprak vd., 2012; Batan ve Toprak, 2020; Atabey ve Toprak, 2018). Bu gazların atmosfere salımı ise fosil yakıtlar ve/veya enerji kaynaklarının kullanılmasından kaynaklandığı bilinmektedir. Bu nedenle Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve Kyoto Protokolü karbon emisyonunu azaltmak için bu tür yakıtların kullanımına sınırlama getirmektedir. Avrupa Birliği başta olmak üzere sözleşme ve/veya protokole taraf ülkelerin tamamı iç mevzuatlarını bu iki uluslararası metne uyarlamak zorundadır. Küresel iklim değişikliğinin hidrolik enerji üzerindeki etkisini şu şekilde özetlemek mümkündür:

Fosil kökenli enerji kaynaklarının kullanımının sınırlandırılmasına bağlı olarak temiz, yenilenebilir, sürdürülebilir, hammadde tüketmeyen ve dışa bağımlılığı azaltacak enerji kaynaklarına yönelim artacaktır. Dolayısıyla hidrolik enerjiye yönelimin ve yatırımların artması beklenmektedir. Zira, küçük akarsu tipi HES'ler son zamanlarda tüm dünyada özellikle dağlık kesimlerde yaygınlaşmaktadır. Küçük HES'ler sadece yatırımcıların arasında değil bilim insanları arasında da çok ilgi görmektedir (Toprak, 2014; Rijal, 2000; CII, 2004;

Malghan,1996; UN, 2006; Demirbaş vd., 2004; Bakış ve Demirbaş, 2004; Kaygusuz, 2001; Balat, 2005; Demirbaş, 2002; Demirbaş ve Bakış,2004; Montes vd., 2005; Öztürk, 2004; Kaygusuz, 2002; Paravan vd., 2004; Bonacci ve Roje, 2003; Vorsic vd., 2000; Molina vd., 2000; Naresh ve Sharma, 2000; Bonacci, 1999; Angelaki ve Harbor, 1995; Hosseini vd., 2005; Paravan vd., 2004). Tarihi su değirmenlerinin hidrolik enerji üretiminde kullanılması da böyle bir yönelimin olacağının diğer bir göstergesidir. Tarihi su değirmenlerinden enerji üretiminde daha geniş detay için Aykaç vd., (2018)'e bakılabilir.

Diğer taraftan iklim değişikliği daha çok ısınma nedeniyle kendisini gösterdiği için sıvı halde kullanılabilir olan su gaz haline dönüşmekte ve doğrudan kullanılabilir olmaktan çıkmaktadır. Buharlaşma nedeniyle akarsularda debinin ve baraj haznelerinde su seviyesinin düşmesine dolayısıyla hidrolik enerjiye beklenen yönelime rağmen hidrolik enerji üretiminde düşüşün yaşanmasına neden olacaktır.

İklimsel değişim, rüzgârlı günlerin sayısı, rüzgâr hızı ve güneşli gün sayısı gibi tüm iklim/meteorolojik değişkenleri anormal hale getirdiği için rüzgâr ve güneş enerjisi sistemleri (RES ve GES) gibi alternatif temiz enerjilerin üretiminde de düzensizliğin meydana gelmesi beklenmektedir. Bu tür santrallerin enerji üretiminde meydana gelmesi beklenen düzensizlik ve güvensizlik nedeniyle hidrolik enerjiye yönelimi kaçınılmaz hale getirebilir.

İklim değişimi nedeniyle yağışlarda meydana gelen düzensizliğin ise doğrudan hidrolik enerji üretimini ciddi şekilde olumsuz yönde etkilemesi beklenmektedir.

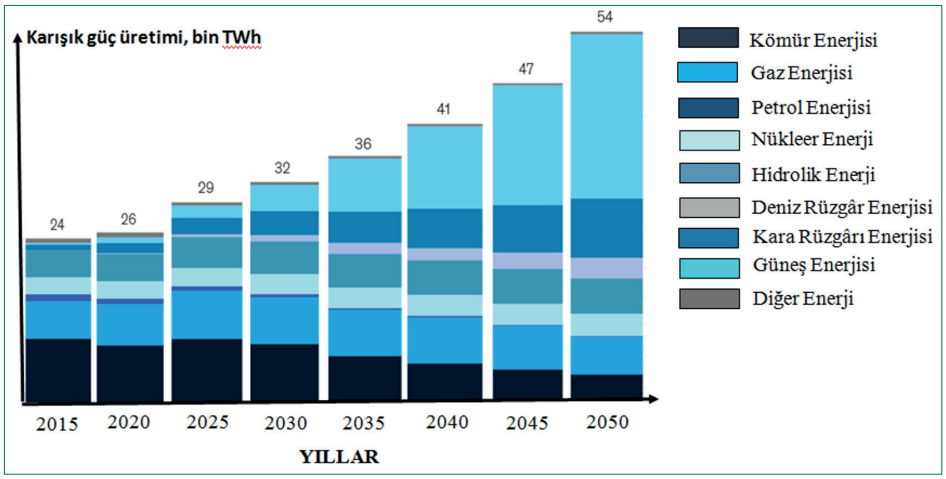
Görüldüğü üzere iklim değişikliği ileriye yönelik olarak hidrolik enerjiye yönelimi artırması beklenmekle birlikte üretimi düşürebileceği de göz ardı etmemek gerekir.

## 6. Dünyada Hidrolik Enerji

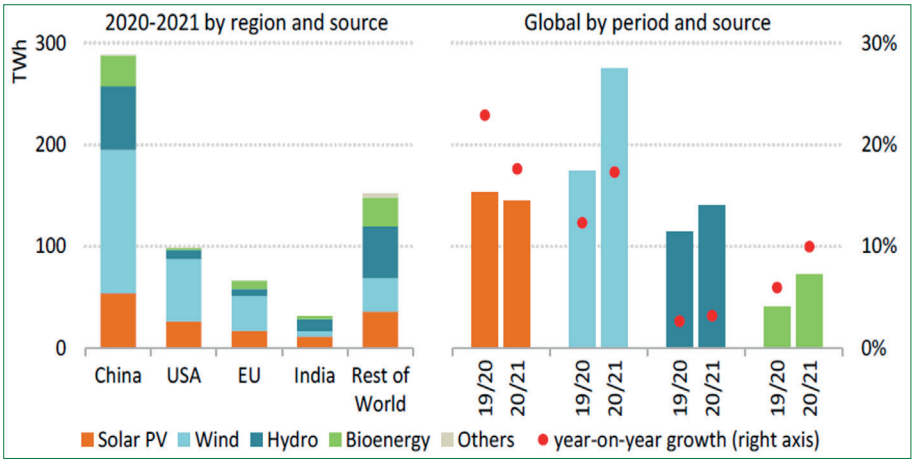
Dünya genelinde hidrolik enerjinin diğer enerji kaynakları arasındaki yerinin ve gelecekteki durumunun görülmesi konunun daha etkili değerlendirilmesi için gereklidir. Bilindiği üzere gelecekte ümit vadeden enerji kaynakları yenilenebilir, sürdürülebilir ve çevre ile barışık temiz enerji kaynaklarıdır. Nitekim dokuz enerji çeşidinin karşılaştırmalı olarak projeksiyonları verilen Şekil 4'ten, 2020 yılında güneş enerjisinin üretimi bir önceki beş yıla (2015) kıyasla yaklaşık iki kat artmıştır. 2025 yılında ise artışın bir önceki beş yıla (2020) göre yaklaşık üç kat olması beklenmektedir. Benzer şekilde 2050 yılına doğru giderken geleceğin enerji kaynağının güneş enerjisi olacağı öngörülmektedir (URL-4, 2022). Bununla birlikte özellikle enerji konusunda yapılan tahminler çok kolay bir şekilde yanıltabilmektedir. Bunun iki nedeninden söz edilebilir: 1) Gelişerek değişen teknolojiye göre her an yeni bir enerji kaynağının gündem bulabilme ihtimali, 2) Küresel boyutta enerji piyasasındaki çoğu kez haksız rekabetçi anlayış. Bu anlayış spekülatif haber ve yorumlara açık ve hatta bunlara karşı korumasızdır.

Diğer taraftan aynı grafikten, deniz rüzgâr enerjisi üretiminde 2020 yılına kadar kısmen artış görülse de uzun vadede düşüş olacağı veya asgari düzeyde sabit kalacağı tahmin edilmektedir. Ancak kara rüzgâr enerjisi üretimi güneş enerjisinden hemen sonra 2020 yılına kadar en çok artan ve 2050 yılına kadar en çok artacağı beklenen ikinci enerji kaynağıdır. Kömür 2020 yılına kadar enerji üretiminde en büyük paya sahiptir. Temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarındaki yönelime rağmen bu durumun 2035 yılına kadar devam etmesi beklenmektedir. Ancak 2040 yılından itibaren tersine bir durumun meydana geleceği yani, kömür kullanımında azalmanın, yenilebilir enerji üretiminde ise artışın olacağı ve kömürün diğer enerjiler içindeki payının düşeceği düşünülmektedir. Gaz enerjisinin 2050 yılına kadar sabit kalacağı da aynı grafikten anlaşılmaktadır. Diğer taraftan hidrolik enerjinin diğer enerjiler içindeki payı her zaman yüksek görülmektedir. Ancak su kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle uzun vadede kurulu güç olarak belirgin bir şekilde artış beklenmemektedir.

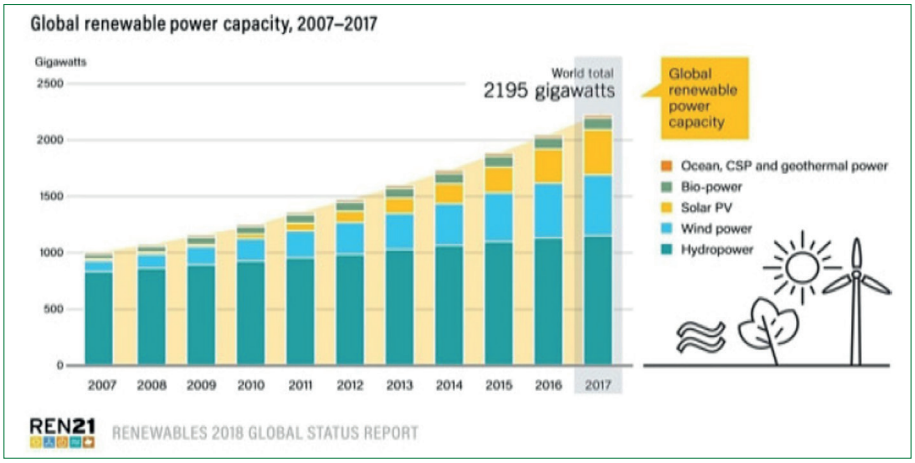
Toplam enerji payı içindeki rolü gittikçe artan ikinci enerjinin ise rüzgâr enerjisi olacağı anlaşılmaktadır (URL-4, 2022). Diğer taraftan, Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2021 küresel enerji araştırmasına göre 2019-2021 döneminde yenilenebilir enerjide en yüksek artış güneş enerjisinde değil rüzgâr enerjisinde olmuştur (URL-3, 2022). Bu da konunun spekülasyonlara açık olduğunun açık bir göstergesidir. Aynı rapor, rüzgâr enerjisinden sonra en büyük artışın biyoenerji ve hidrolik enerjide meydana geldiğini, güneş enerjisinde ise bir önceki periyoda göre azalmanın olduğunu belirtmektedir (Şekil 5). 2007 – 2017 periyodu için yenilenebilir enerji kaynaklarının toplam kurulu güçleri açısından karşılaştırmalı olarak verildiği Şekil 6'ya göre yenilenebilir enerji kaynakları içinde en yüksek paya sahip olan hidrolik enerjidir (URL-6, 2018). HES yüzyıllar ile ifade edilebilecek kadar uzun bir süredir temiz, hammadde tüketmeyen, çevre ile barışık, sürdürülebilir ve yenilenebilir enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Ancak artış oranı rüzgâr ve güneş enerjisi üretimine nazaran daha düşüktür.




***Şekil 4.*** *Dünyada kaynağına göre enerjilerin dünü, bugünü ve yarını (URL-4,2022)*



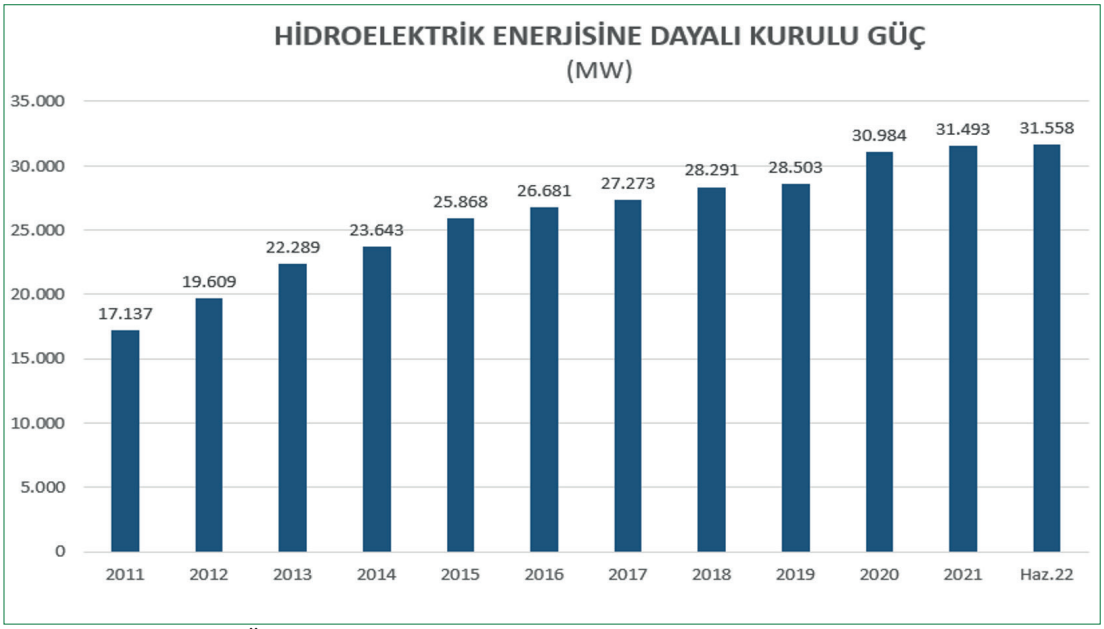

***Şekil 5.*** *Bölgelere, kaynağına ve periyoda göre 2019 – 2021 yenilenebilir enerjilerin üretimi (URL-3, 2022)*



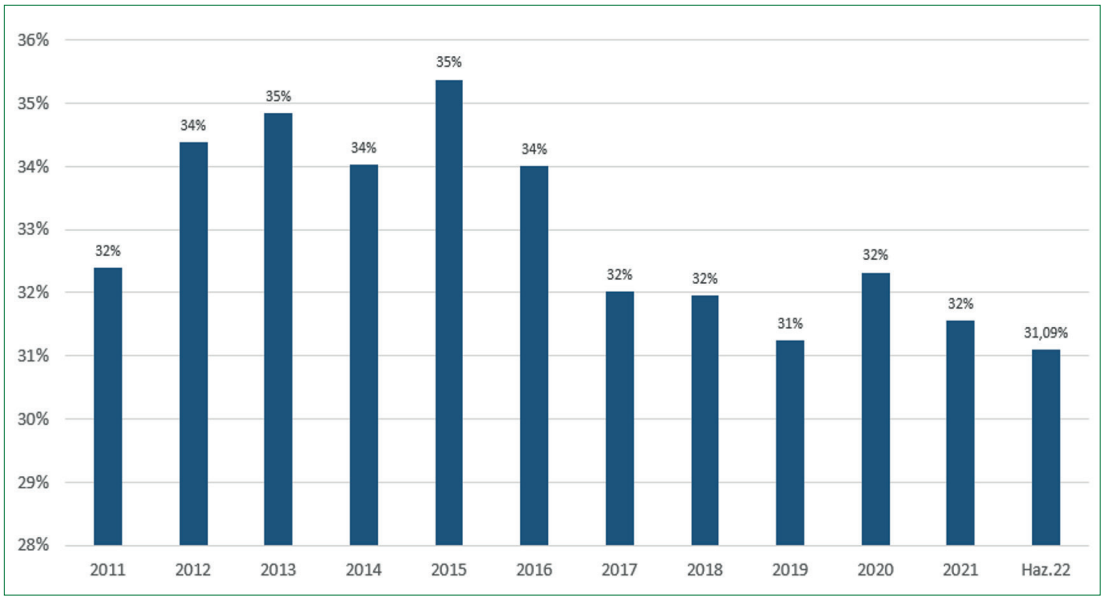

***Şekil 6.*** *Küresel boyutta yıllara göre yenilenebilir enerji üretimindeki değişim (URL-6,2022)*

## 7. Ülkemizde Hidrolik Enerji

Ülkemizde kurulu güç itibari ile hidrolik enerji 2011 yılından itibaren adeta düzenli bir şekilde artış göstermiştir (Şekil 7). Bu artışa rağmen, güneş ve rüzgâr enerjisi, doğal gaz, nükleer enerji gibi diğer enerjilerin üretimindeki artış nedeniyle hidrolik enerjinin tüm enerji türleri içindeki payı 2015 yılından itibaren gittikçe düşmüştür (Şekil 8). Haziran 2022 sonu itibariyle hidrolik enerjiye dayalı elektrik kurulu gücümüz 31558 MW ile toplam kurulu güç içerisindeki oranı %31'e gerilemiştir (URL-1, 2022). Yıllara göre kurulu güç değişimi ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir (URL-1, 2022). 2021 yılında hidroelektrik kaynaklı 55,5 milyar kWh elektrik üretilmiştir. 2022 Mayıs sonu itibariyle hidrolik kaynaklı elektrik üretimi yaklaşık 35,2 milyar kWh değerine ulaşmıştır (URL-1, 2022).

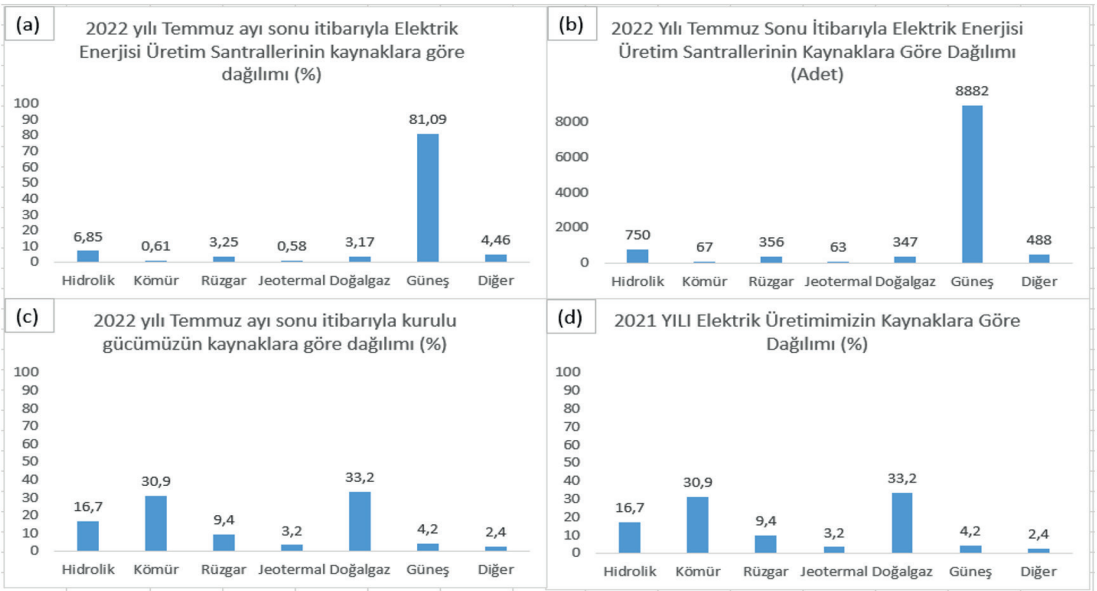



***Şekil 7.*** *Ülkemizde yıllara göre hidroelektrik kurulu güç değişimi (URL-1, 2022)*




***Şekil 8.*** *Ülkemizde hidrolik enerjinin toplam kurulu güç içerisindeki oranı*

Türkiye elektrik enerjisi tüketimi 2021 yılında bir önceki yıla göre %8,74 artarak yaklaşık 333 milyar kWh, elektrik üretimi ise bir önceki yıla göre %9,14 oranında artarak yaklaşık 335 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir (URL-1, 2022). (Şekil 9)




***Şekil 9.*** *Ülkemizde elektrik enerjisinin, santral sayısı ve yüzdesi, kurulu güç ve üretimin kaynaklara göre dağılımı: a) 2022 yılı Temmuz ayı sonu itibarıyla elektrik enerjisi üretim santrallerinin kaynaklara göre dağılımı (%), b) 2022 yılı Temmuz sonu itibarıyla elektrik enerjisi üretim santrallerinin kaynaklara göre dağılımı (Adet), c) 2022 yılı Temmuz ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı (%), d) 2021 yılı elektrik üretimimizin kaynaklara göre dağılımı (%) (URL-1,2022)*

Yenilenebilir, sürdürülebilir ve temiz bir enerji kaynağı olarak hidrolik enerji yatırımları dünya genelinde ve ülkemizde büyük bir hızla devam etmektedir. Ülkemizde biriktirmeli HES potansiyeli büyük ölçüde değerlendirilmiştir. Ancak tüm çabalara rağmen halen toplam elektrik enerjisi üretimi içinde, hidrolik enerjinin payı, kurulu güç itibari ile %31 ve üretim itibari ile de %16,7'dir. Tablo 1'de 2020 – 2040 yılları için enerji talep projeksiyonları verilmiştir (URL-1, 2022). Tablo 2'de ise arz talep dengesi aynı zaman periyotları için verilmiştir. Bu iki tabloya göre teknik ve ekonomik olarak değerlendirilebilir hidrolik enerji potansiyelinin tamamı bile işletmeye açılsa 2040 yılı elektrik enerji talebinin ancak %34'ü karşılanabilmektedir. Bilindiği üzere teknoloji büyük bir hızla gelişmektedir. Bu gelişmeye bağlı olarak teknik ve ekonomik olarak değerlendirilebilir hidrolik enerji potansiyeli de artabilir. Ancak hiçbir zaman 433 TWh olan brüt (teorik) değeri aşamaz. Bu değere ulaşsa bile 2040 yılında beklenen talebin ancak %68,1'ini karşılayabilmektedir. Diğer taraftan biriktirmesiz HES potansiyelinin değerlendirilmesine daha yeni başlanmıştır. Dünyada yaygın olmasına rağmen ülkemizde mevzuat alt yapısı yeni yeni tamamlanmış ve biriktirmesiz HES'lere yönelme olmuştur. Bazı dezavantajları olmasına rağmen biriktirmesiz HES'ler birçok avantajı nedeniyle biriktirmeli HES'lere göre tercih edilebilir. En küçük su kaynağının değerlendirilmesi kaçınılmazdır ve bu kaynakları değerlendirmenin enerji üretimi açısından en iyi yolu biriktirmesiz HES kurulumudur.

***Tablo 1.*** *2020-2040 Arası Ülkemiz Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu (URL-1, 2022)*

| **Senaryolar** | **2020-2040 Arası Ülkemiz Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **2020** | **2025** | **2030** | **2035** | **2040** |
| **Senaryo 1** | 305 | 366 | 427 | 485 | 545 |
| **Senaryo 2** | 305 | 370 | 440 | 507 | 591 |
| **Senaryo 3** | 305 | 373 | 450 | 527 | 636 |

***Tablo 2.*** *2020-2040 Arası Ülkemiz Elektrik Enerjisi Arz/Talep Projeksiyonu (URL-1, 2022)*

| **Türkiye Hidrolik Enerji Potansiyeli** | **2020-2040 Arası Türkiye Elektrik Enerjisi Talep Projeksiyonu (Senaryo 3, en kritik senaryo)** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **2020 (305 TWh)** | **2025 (373 TWh)** | **2030 (450 TWh)** | **2035 (527 TWh)** | **2040 (636 TWh)** | |
| Teorik hidroelektrik potansiyeli (433 TWh) | 142,0 | 116,1 | 96,2 | 82,2 | 68,1 | Potansiyel/ Talep |
| Teknik değindirilebilir potansiyel (305 TWh) | 100,0 | 81,8 | 67,8 | 57,9 | 48,0 | Potansiyel/ Talep |
| Teknik ve ekonomik değerlendirilebilir potansiyel | 70,8 | 57,9 | 48,0 | 41,0 | 34,0 | Potansiyel/ Talep |

## 8. Sonuç ve Öneriler

Küresel iklim değişikliği tüm meteorolojik değişkenlerde olduğu gibi yağışlarda da konumsal ve zamansal bir düzensizliği beraberinde getirmektedir. Bu durum, zaten zamansal ve konumsal olarak yeryüzüne heterojen dağılan yağış ve su kaynaklarını daha da heterojen hale getirmekte ve hidrolik, güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir enerji üretimini olumsuz etkilemekte ve hatta bu üretimleri riske sokmaktadır. Su kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle gerek dünyada gerek Türkiye'de gelecekte hidrolik kurulu güçte faza bir artış beklenmemektedir. Değişen ve gelişen teknolojiye bağlı olarak teknik ve ekonomik olarak değerlendirilebilir hidroelektrik enerji potansiyeli artabilir. Ancak bu hiçbir zaman ülkelerin teorik (brüt) hidroelektrik potansiyelini aşamaz. Türkiye'de teorik potansiyelin tamamı kullanılsa bile ancak enerji talebinin %68,1'i karşılanabilmektedir. Türkiye'nin halihazırda teknik ve ekonomik olarak değerlendirilebilir hidrolik güç potansiyelinin tamamı işletmeye açılsa bile 2040 yılı talebinin ancak %34'ü karşılanabilecektir. Bu bağlamda, GAP'ın en kısa zamanda tüm bileşenleri ile tamamlanması gereklidir. Değişen ve gelişen teknolojiye ve ihtiyaca göre Türkiye'nin, hidrolik enerji potansiyelinin yeniden belirlenmesi günümüzde zorunlu hale gelmiştir. Yeniden belirlenecek

olan bu potansiyelin işletmeye açılması için en küçük su kaynaklarının bile değerlendirilmesi gereklidir. Bunun için de biriktirmesiz HES'lere ağırlık verilmelidir. Ancak biriktirmeli veya biriktirmesiz tüm baraj ve HES'ler için çok disiplinli, ciddi ve dikkatli bir çevresel fizibilite yapılmalıdır. Bunun için gerekirse mevzuat değişikliği yapılması düşünülmelidir. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi ve Kyoto Protokolü yükümlülükleri de dikkate alınarak mümkün olduğunca hidrolik, güneş, dalga, rüzgâr ve benzeri temiz, yenilenebilir, sürdürülebilir enerji kaynaklarına ağırlık verilmelidir.

## 9. Kaynaklar / References


Angelaki V., & Harbor JM. (1995). Impacts of flow diversion for small hydroelectric power plants on sediment transport, northwest Washington. *PHYSICAL GEOGRAPHY,* 16(5), 432-443.

Atabey S. & Toprak Z.F.(2018). Bitlis ve Muş illerinin iklim değişikliği çerçevesinde uzun dönem sıcaklık değişimi karşılaştırması. *DÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 9(1), 419 – 428.

Aykaç Z, Karakaya D, & Toprak ZF (2018). Su Değirmenlerinin Hidrolik Enerji Potansiyelinin Araştırılması- Diyarbakır Örneği. *DÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 9(1), 515 – 527.

Bakış R., & Demirbaş A. (2004). Sustainable development of small hydropower plants (SHPs). *ENERGY SOURCES,* 26(12), 1105-1118.

Balat M. (2005). Current hydropower potential in Türkiye and sustainability of hydropower for Türkiye's energy demand. *Energy Exploratıon & Exploıtatıon*, 23(1), 1-18.

Batan M. & Toprak Z.F. (2017). Financial comparison of the Kyoto Protocol obligations and the natural disaster losses. *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, 7(2/2), 180-189.

Batan M. & Toprak Z.F. (2015). Küresel iklim değişikliğinin olumlu etkileri ve bu etkilerin iklim değişikliğine uyum kapsamında değerlendirilmesi. *DÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 6(2), 93-102.

Batan M. & Toprak Z.F. (2020). İklim Değişikliğinde Etkenler ile Sonuçların Birbirini Tetiklemesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(2), 759–769. https://doi.org/10.24012/dumf.547015

Bonacci O.(1999). Water circulation in karst and determination of catchment areas: example of the River Zrmanja. *HYDROLOGICAL SCIENCES JOURNAL-JOURNAL DES SCIENCES HYDROLOGIQUES,* 44(3), 373-386.

Bonacci O., & Roje-Bonacci T. (2003). The influence of hydroelectrical development on the flow regime of the karstic river Cetina. *Hydrological Processes,* 17(1), 1-15.

CII – Godrej GBC Publication (2004). Small Hydro – Potential & Prospects, RES - Fact Sheet - No.2.

Çelik R. & Toprak Z.F. (2016). Küresel İklim Değişikliğinin Diyarbakır Kent Merkezi Yeraltı Suyu Seviyesine Etkisi. *DÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 7(2), 279-290.

Loudière D.& Gourbesville P. (2020). Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020: L'eau et les changements climatiques (Birleşmiş Milletler Dünya Su Geliştirme Raporu 2020: Su ve İklim Değişikliği), La Houille Blanche, June 2020, 3, 76–81. DOI: 10.1051/lhb/2020024

De La Salle University, httpURs://www.dlsu.edu.ph/research/centers/cemtre/mhp.asp

Demirbaş A. (2002). Sustainable developments of hydropower energy in Türkiye. *Energy Sources,* 24(1), 27-40.

Demirbaş A., & Bakış R. (2004). Energy from renewable sources inTürkiye: Status and future direction. *Energy Sources,* 26(5), 473-484.

Demirbaş A., Sahin-Demirbaş A., & Demirbaş A.H. (2004). Türkiye's natural gas, hydropower, and geothermal energy policies. *Energy Sources,* 26(3), 237-248.

URL-1: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-hidrolik Erişim Tarihi: 21.09.2022

URL-2 Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/ENTAP/114176turkiye_elektrik_enerjisi_talep_projeksiyonu_raporu.pdf. Erişim Tarihi: 21.09.2022

URL-3: International Energy Agency, IEA, Global Energy Review 2021, Assessing the effects of economies recoveries on global energy demand and CO2 emissions in 2021. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021/co2-emissions, Erişim Tarihi: 24.03.2022.

URL-4: Global Energy Perspective. (2022). https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2021, Erişim Tarihi: 31.03.2022

URL-5: Green Empowerment. http://www.greenempowerment.org/aboutus.htm

URL-6: Renewables, (2018). https://www.ren21.net/gsr-2018/chapters/chapter_01/chapter_01/ Erişim Tarihi: 28.10.2022.

Hosseini SMH., Forouzbakhsh F., Rahimpoor M. (2005). Determination of the optimal installation capacity of small hydro-power plants through the use of technical, economic and reliability indices. *ENERGY POLICY*, 33(15), 1948-1956.

Int. J. Hydropower & Dams Markets of Small Hydropower in Asia, Dr. Drona Upadhyay, IT Power

Karakaya D., & Toprak Z.F. (2018). İçme Suyu Şebekelerindeki Su Kayıplarının ZFT Algoritması Kullanılarak Sınıflandırılması Classification Water Losses in Water Distribution Networks Using ZFT Algorithm. *Su Kaynakları*, 3(2), 22–30.

Kaygusuz K. (2002). Sustainable development of hydroelectric power. *ENERGY SOURCES*, 24(9), 803-815.

Kaygusuz K.(2001). Hydropower and biomass as renewable energy sources in Türkiye. *Energy Sources*, 23(9), 775-799.

Kaynak: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik. Erişim Tarihi: 21.09.2022.

Kınık Z. & Toprak Z.F. (2016). Halkın İklim Değişikliğine Bakışı: Diyarbakır İçin Bir Alan Çalışması. *DÜ Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 7(2), 329-341.

Malghan V.R. (1996). History of MHD power plant development. *Energy Conversion and Management*, 37(5), 569-590.

Molina J.M., Isasi P., Berlanga A., & Sanchis A. (2000). Hydroelectric power plant management relying on neural networks and expert system integration. *Engineering Applications Of Artificial Intelligence,* 13(3), 357-369.

Montes G.M., Martinez-Montes G., Rubio-Gamez MC., Alegre-Bayo J, Ordonez-Garcia J., & Oliver-Pina J. (2005). Viability of mini hydroelectric power plants. Risk analysis approach. *INGENIERIA HIDRAULICA EN MEXICO*, 20(1), 5-18.

Naresh R, & Sharma J. (2000). A hybrid method for hydroelectric generation scheduling using an artificial neural network. *International Journal Of Systems Science*, 31(2), 263-271.

Öztürk H.K. (2004). Present status and future prospects of hydroelectric energy in Türkiye. *Energy Sources,* 26(9), 829-840.

Özgür, E. M. (2017). Nüfus Dinamikleri, Çevre ve Sürdürülebilirlik. *Coğrafi Bilimler Dergisi CBD,* 15(1), 1- 26.

Paravan D., Stokelj T., & Golob R. (2004). Improvements to the water management of a run-of-river HPP reservoir: methodology and case study. *Control Engineering Practice,* 12(4), 377-385.

Rijal K. (2000). Mini- and Micro- Hydro Power Development: Status, Issues and Strategies for the Hindu Kush Himalayan Region. *A Journal of Engineering (Publication of NESS)*, Vol. 9. Institute of Engineering, Kathmandu, Nepal.

Songur M., Hamidi N., Toprak Z.F., & Dabanlı A. (2012). Developing Mathematical Model For Losses in Water Distribution Network by Integration of SCADA, GIS and Customer Information System. *AWERProcedia Information Technology & Computer Science*, 3, 1494-1498.

Şevgin F., & Toprak Z.F. (2021). Meteorolojik Akış Katsayısının Bulanık SMRGT Yöntemi ile Belirlenmesi: Murat Havzası Örneği. 12(2), 401 - 409, DOI: 10.24012/dumf.844325.

Toprak Z.F. (2009). Flow Discharge Modeling in Open Canals Using a New Fuzzy Modeling Technique (SMRGT). *CLEAN-Soil, Air, Water*, 37(9), 742–752, DOI: 10.1002/clen.200900146.

Toprak Z.F. (2014). Türkiye'de ve Dünyada Hidrolik Enerji Potansiyeli. *Mimar ve Mühendis Grubu Dergisi*, 75, 60-64.

Toprak Z.F. (2016). Ideal Velocity: A New Concept for Open Channel Flows. *Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering,* 5(3), 116-121.

Toprak Z.F. (2016). What is the Global Climate Change? With the Perspective of the People Who Live. *International Journal of Environmental Protection*, 6(1), 134-137.

Toprak Z.F. (2022). Farklı Yaklaşımlarla Enerji Kaynakları, Editörler: Orhan Kavak ve Yusuf Kenan Haspolat, Orient Yayınları, ISBN: 978-975-6124-96-3, e-ISBN: 978-975-6124-97-0, Kitap Bölümü, s.383-397.

Toprak Z.F., Hamidi N., Toprak Ş, & Şen Z. (2013). Climatic identity assessment of the climate change. *Int. J. Global Warming*, 5(1), 30–45, DOI: http://dx.doi.org/10.1504/IJGW.2013.051480.

Toprak Z.F., Öztürkmen G., Yılmaz S., Dursun F., Yalçın Bayar G., Em A., & Hamidi N.(2009). Diyarbakır Kent Merkezi İçin Sıcaklık Verilerinin İstatistiksel Analizi (Statistical Analyses of Temperature Data for Diyarbakir City Center). İklim Değişikliği ve Çevre (Climate Change and Environment), 1(2), 49-74.

Toprak Z.F., Selek B., Karaaslan Y., Yenigün K., Gümüş V., & Aydoğdu M. H. (2018). Bir Havzanın Su Bütçesinin Belirlenmesi İçin Yeni Bir Yaklaşım. *Su Kaynakları*, 3(2), 51–60.

Toprak Z.F., Songur M., Hamidi N. & Gulsever H. (2012). Determination of Losses in Water-Networks Using a New Fuzzy Technique (SMRGT). *AWERProcedia Information Technology & Computer Science*, 3, 833-840.

Toprak Z.F., Toprak S., & Hamidi N. (2012). Changement Climatique et Identite Climatique. *Le Journal de I'Eau et de I'Environnement, Revue Scientifique et Technique*, 81-91.

UN Headquarters (2006). Assessing Policy Options for Increasing the Use of Renewable Energy For Sustainable Development: Modelling Energy Scenarios For Ghana, New York, NY, USA

Vorsic J., Orgulan A., Horvat M., & Koritnik D. (2000). Very small hydroelectric plants - Their influence on the supply network. *Ieee Transactıons On Energy Conversıon*, 15(3), 323-327.

## Yazar Hakkında / About Author

**Prof. Dr. Z. Fuat TOPRAK | Dicle Üniversitesi |**
**toprakzf[at]dicle.edu.tr | ORCID: 0000-0003-0876-1165**

1967'de Diyarbakır'da doğdu. İlkokulu Hızırilyas Köyü İlkokulunda, ortaokulu Diyarbakır Ali Emiri Ortaokulunda, Liseyi Gaziantep Lisesi'nde, Lisans öğrenimini DÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde, yüksek lisansını Fırat Üniversitesi'nde ve doktorasını İTÜ'de tamamladı. 2011 yılında doçent, 2017 yılında profesör oldu. Kendi alanında, 11 tanesi kitap ve kitap bölümü olmak üzere 140 tane basılı çalışması mevcuttur. Çalışmalardan bazıları en iyi 10 ve 25 makale listelerinde yer aldı. Uluslararası literatüre kendi adı ile anılan iki yöntem ve dört konsept kazandırdı. Kendi yöntemlerini paylaşmak üzere çok sayıda ülke tarafından davet edildi. Bir kısmı davetli konuşmacı olmak üzere 100'ün üstünde ulusal ve uluslararası akademik toplantıya konuşmacı olarak katıldı. Çok sayıda projeye danışmanlık yaptı. 50'nin üstünde davet üzerine müstakil seminerler verdi. Şırnak Üniversitesi'nde rektör yardımcılığı yaptı (2018 – 2019). Halen DÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde bölüm başkanlığı görevini sürdürmektedir. İki kez Akademik Performans Ödülüne layık görüldü. Satranç oynar, şiir yazar, kitap okumayı ve seyahat etmeyi sever.

**Prof. Dr. Z. Fuat TOPRAK | Dicle University |**
**toprakzf[at]dicle.edu.tr | ORCID: 0000-0003-0876-1165**

He was born in Diyarbakir in 1967. He graduated from Hizırilyas Village Primary School, Diyarbakir Ali Emiri Secondary School, Gaziantep High School, DÜ Civil Engineering Department, Fırat University (Master) and ITU (PhD). He became associate professor in 2011 and professor in 2017. He has 140 of published works in his field, 11 of which are books or book chapters. Some of his studies have been listed in the top 10 and top 25 paper lists. He brought two methods and four concepts to the international literature. He was invited by many countries to share his methods. He participated as a speaker in more than 100 national and international academic meetings, some of which were invited speakers. He has consulted many projects. He invited to give more than 50 separate seminars. He worked as the vice rector of Sirnak University (2018 – 2019). He is still working as the head of the Department of Civil Engineering at DU. He was awarded twice. He plays chess, writes poetry, enjoys reading and traveling.

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE TÜRKİYE HİDROELEKTRİK ENERJİ PLANLAMASI

## CLIMATE CHANGE AND TÜRKİYE HYDROELECTRIC ENERGY PLANNING

*Özgür SARHAN*
*Tuğba ATLI*
*Funda GÜNDOĞAN*

 DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch14

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ VE TÜRKİYE HİDROELEKTRİK ENERJİ PLANLAMASI

***Özgür SARHAN***
*Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*

***Tuğba ATLI***
*Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*

***Funda GÜNDOĞAN***
*Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*

**Özet**

Bakanlığımızın strateji ve politikaları; enerji arz güvenliğinin sağlanması, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve yerli/yenilenebilir kaynakların ekonomiye kazandırılması temellerine dayanmaktadır. Bu çalışmanın ilk aşamasında Türkiye elektrik kurulu gücünde ve elektrik üretiminde hidroelektrik santrallerin payı incelenmiş, kısa ve uzun dönemli hava tahminleri ve yağış projeksiyonları çerçevesinde hidroelektrik üretim ve mevsimsellik ilişkisi ele alınmış ve değerlendirilmiştir. İklim değişikliğinin hidroelektrik santrallerden elde edilen elektrik enerjisi üzerindeki olumsuz etkisi nedeni ile enerji ithalatına olan bağımlılığımız artmaktadır. 2015 yılına kadar doğal gaz santralleri ile hidroelektrik santraller benzer üretim profili çizerken bu yıldan sonra yaşanan kuraklıklarla beraber birbirlerini tamamlayıcı şekilde bir çalışma rejimine geçmişlerdir. Son dönemde enerji emtia fiyatlarında yaşanan hızlı yükselişin ana sebepleri arasında pandemi sonrası hızla artan enerji talebi, tedarik zincirlerinde oluşan sorunlar sebebiyle arzın talebi karşılayamaması, küresel iklim değişikliği nedeniyle yaşanan kuraklık ve spekülatif hareketler ayrıca Rusya-Ukrayna krizi gösterilebilmektedir. Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de kurak dönemlerde hidroelektrik santrallerden üretilemeyen enerji açığının farklı kaynaklardan tedarik edilmesi gerekmekte olup bu da enerji ithalat maliyetlerinde ciddi artışlara sebep olmaktadır. Bu çalışmanın son aşamasında 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi esas alınarak 2035 yılına kadar olan dönemi kapsayan Türkiye Ulusal Enerji Planı tüm yönleriyle değerlendirilmiştir. Plan hazırlanırken nüfus, ekonomik gelişim, yakıt fiyatları gibi temel göstergeler dikkate alınarak sanayi, mesken, hizmetler, tarım ve ulaştırma sektörlerinde enerji talebi oluşturan sektörel aktiviteler tahmin edilmiştir. Mevcut durumda kurulu güç içinde en fazla paya sahip olan hidroelektrik santrallerin payı, maksimum kurulu güç potansiyeline yaklaşmış bulunmaktadır. Bu plana göre, hidroelektrik santrallerin kurulu gücünün orta-uzun dönemde 35,1 gigavat (GW)'a çıkacağı belirtilmiştir. Toplam elektrik üretimindeki artışın etkisiyle hidroelektrik santrallerin toplam üretimdeki payının 2035 yılında %17,3 olması beklenmektedir. Söz konusu çalışma yazarların kişisel çalışması olup Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının resmi görüşü olarak değerlendirilemez.

***Anahtar Kelimeler***
*Enerji, Hidroelektrik santral, Enerji planlaması, İklim değişikliği, Elektrik fiyatları*

# CLIMATE CHANGE AND TÜRKİYE HYDROELECTRIC ENERGY PLANNING

***Özgür SARHAN***
*Ministry of Energy and Natural Resources*

***Tuğba ATLI***
*Ministry of Energy and Natural Resources*

***Funda GÜNDOĞAN***
*Ministry of Energy and Natural Resources*

**Abstract**

Strategies and policies of the Ministry are based on the principles of ensuring energy supply security, diversifying energy resources and bringing domestic/renewable resources into the economy. In the first stage of this study, the share of hydroelectric power plants in Türkiye's installed power and electricity production was examined, and the relationship between hydroelectric generation and seasonality was discussed and evaluated within the framework of short and long-term weather forecasts and precipitation projections. Due to the negative impact of climate change on the electrical energy obtained from hydroelectric power plants, our dependence on energy imports has been increasing. While natural gas power plants and hydroelectric power plants had a similar production profile until 2015, they switched to a complementary working regime with the droughts experienced after this year. Among the main reasons for the rapid increase in energy commodity prices in the recent period, the rapidly increasing energy demand after the pandemic, the inability of the supply to meet the demand due to the problems in the supply chains, the drought and speculative movements due to global climate change, as well as the Russia-Ukraine crisis can be shown. As in the whole world, the energy deficit, which cannot be produced from hydroelectric power plants in our country during dry periods, needs to be supplied from different sources, and this has led to serious increases in energy import costs. In the last stage of this study, Türkiye's National Energy Plan covering the period until 2035 was evaluated in all its aspects, based on the 2053 Net Zero Emission Target. While preparing the plan, energy demand and sectoral activities in the industry, housing, services, agriculture and transportation sectors were estimated by taking into account the basic indicators such as population, economic development and fuel prices. Currently, the share of hydroelectric power plants, which have the largest share in the installed power, has approached the maximum installed power potential. According to this plan, it is stated that the installed power of hydroelectric power plants will increase to 35.1 gigawatt (GW) in the medium-long term. With the effect of the increase in total electricity production, the share of hydroelectric power plants in total generation is expected to be 17.3%in 2035. The study is the personal work of the authors and cannot be considered as the official opinion of the Ministry of Energy and Natural Resources.

***Keywords***
*Energy, Hydroelectric power plant, Energy planning, Climate change, Energy prices*

## 1. Giriş

Bakanlığımızın strateji ve politikaları; enerji arz güvenliğinin sağlanması, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve yerli/yenilenebilir kaynakların ekonomiye kazandırılması temellerine dayanmaktadır. Bu kapsamda Ülkemiz, 2017 yılında Milli Enerji ve Maden Politikasını açıklamıştır. Enerji arz güvenliğinin sağlanması, enerjide ve doğal kaynaklarda öngörülebilir piyasalar ve yerlileştirme başlıkları bu belgenin sac ayaklarını oluşturmuştur. Bu bağlamda doğal gaz ve yenilenebilir enerji alanında önemli yatırımlar gerçekleştirilmiş ve arz güvenliği konularında ek önlemler alınmıştır.

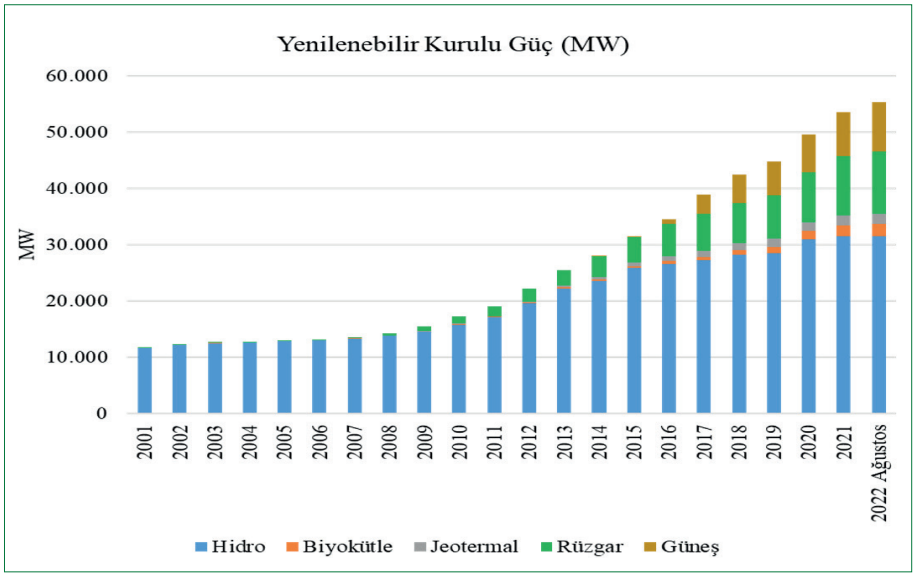
Bilindiği üzere enerji kaynaklarımızı verimli ve çevreye duyarlı bir şekilde değerlendirerek ülke refahına en yüksek katkıyı sağlama misyonu çerçevesinde, enerjide ithalat bağımlılığını azaltma adına yerli ve yenilenebilir kaynaklarımızdan maksimum seviyede faydalanarak elektriğin kaliteli, sürekli, uygun maliyetli ve çevreye duyarlı bir şekilde tüketicilerin kullanımına sunulması doğrultusunda politikalar benimsenmektedir. Ayrıca 11. Kalkınma Planı ve Bakanlığımız 2019-2023 Stratejik Planı'nda da enerjide ithalat bağımlılığını azaltma doğrultusunda hedefler benimsenmiştir. Bu kapsamda özellikle son 10 yıllık dönemde yerli ve yenilenebilir elektrik kapasitemizde kayda değer bir ilerleme gerçekleşmiştir.

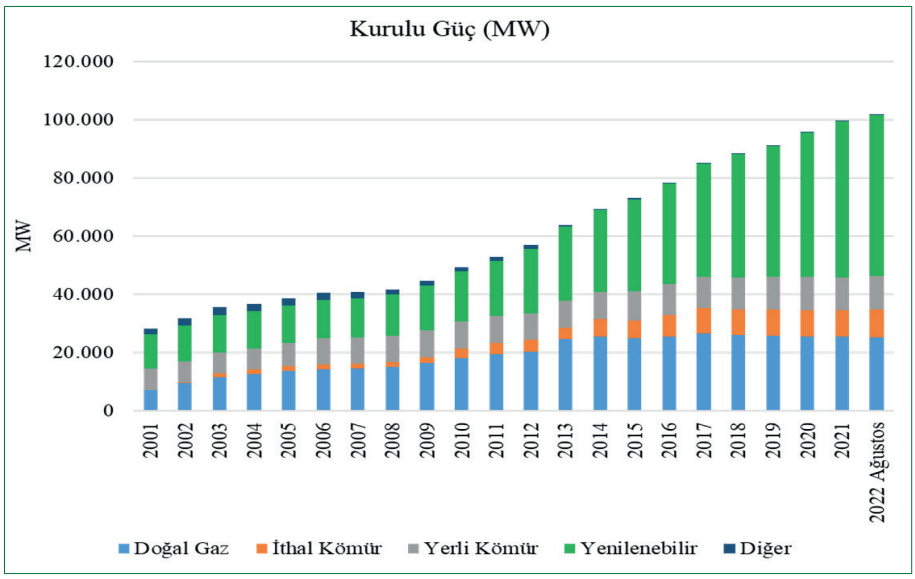
## 2. Türkiye Enerji Görünümü

2001 yılında 28.332 megavat (MW) olan elektrik kurulu gücümüzün %41,4'lük kısmına karşılık gelen yenilenebilir kaynaklara dayalı kurulu gücümüzde özellikle de 2017 yılında ilan edilen Milli Enerji ve Maden Politikası sonrasında gözle görülür bir ilerleme kaydedilmiştir. Bu doğrultuda 2016 yılının sonunda 78.497 MW değerinde olan elektrik kurulu gücümüz 2022 yılı ağustos ayı sonu itibarıyla 102.043 MW seviyesine ulaşmıştır. Bu kapasitenin %65,3'ü yerli, %54,3'lik kısmı ise yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır.

Enerji sektörüne ilişkin ana strateji belgesi olan Bakanlığımız 2019-2023 Stratejik Planında 2023 yılı sonuna kadar; rüzgâr enerjisinde 11.883 MW, güneş enerjisinde 10.000 MW, hidroelektrik enerjide 32.037 MW, jeotermal ve biyokütlede ise toplam 2.884 MW kurulu güce ulaşılması hedeflenmiştir. 2022 yılı ağustos ayı sonu itibarıyla ülkemizin elektrik kurulu gücünün 31.568 MW'ı hidroelektrik, 8.793 MW'ı güneş enerjisi, 3.894 MW'ı jeotermal ile biyokütle enerjisi, 11.137 MW'ı ise rüzgar enerjisinden oluşmaktadır (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, ETKB, 2022). (Şekil 1)

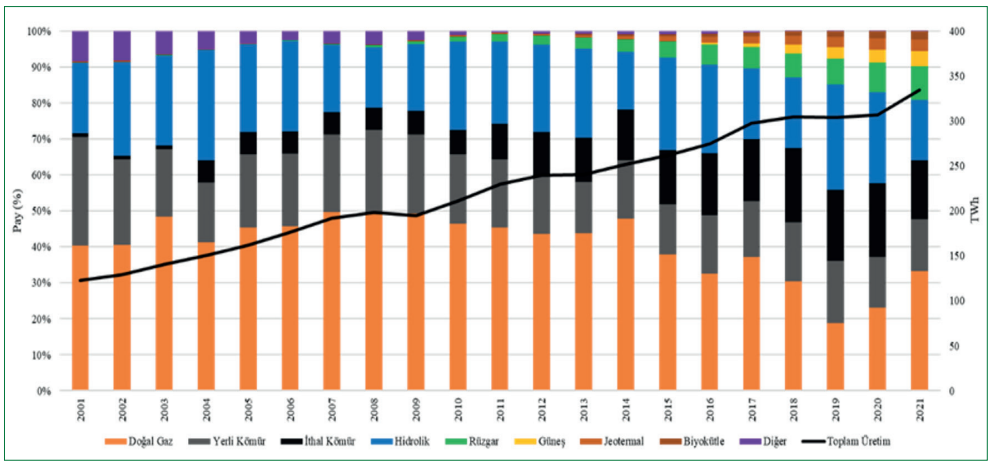
Kaynaklara göre üretim değerlerinin yer aldığı Şekil 2'de 2021 yıl sonu itibarıyla toplam elektrik üretiminin yaklaşık 335 teravat saat (TWh) olduğu görünmektedir. Oldukça kurak bir yıl olmasına rağmen 2021 yılı elektrik üretiminin %16,7'si hidroelektrik kaynaklardan karşılanmıştır. 2000'li yıllarda yıllık bazda elektrik üretiminde hidroelektrik kaynakların payı mevsimsel etkiler nedeniyle %16 ila %31 arasında değişiklik göstermiştir.



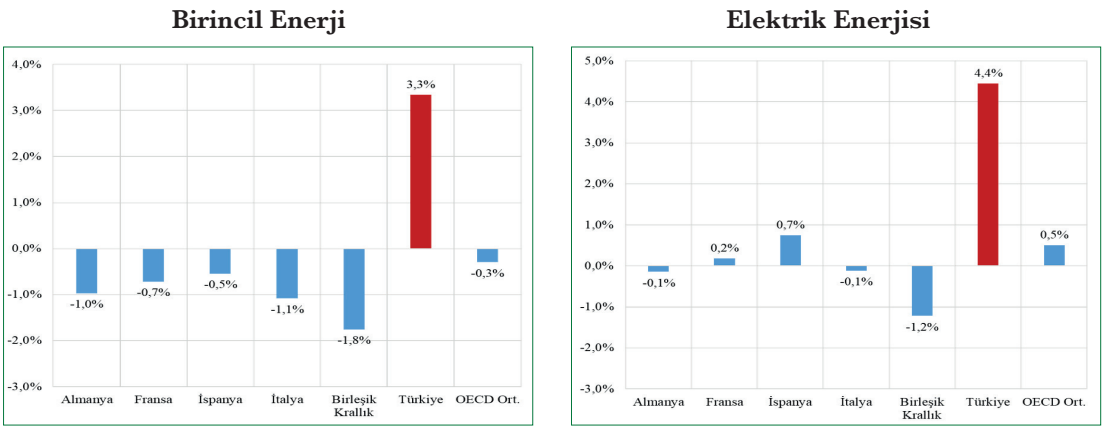




***Şekil 1.*** *Kurulu güç (MW) /yenilenebilir kurulu güç (MW) Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ, 2022)*

Ülkelere göre talep artış oranların incelendiğinde, 2000-2020 arası yirmi yıllık dönemde ülkemizin birincil enerji ortalama enerji talep artış oranı benzer ülkelerden yüksek seyretmektedir. Şekil 3'te görüleceği üzere yirmi yıllık dönemde ülkemizin ortalama birincil enerji talep artışı %3,3 'tür. Yine aynı dönem için elektrik enerjisi talep artış oranına baktığımızda ülkemiz %4,4'lük oran ile Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü (OECD) ülkeleri içinde en yüksek orana sahip ülkelerden biridir.




***Şekil 2.*** *Kaynaklara göre elektrik üretimi (TEİAŞ, 2022)*

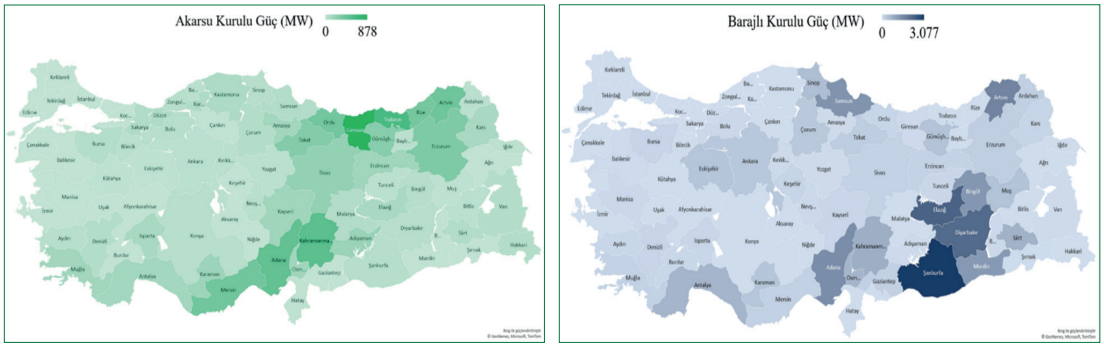



***Şekil 3.*** *2000-2020 arası ortalama birincil enerji-elektrik enerjisi talep artış oranı. Uluslararası Enerji Ajansı (UEA,2022)*

## 3. Türkiye'de Hidrolik Enerji

2022 yılı ağustos sonu itibarıyla ülkemizde 8.293 MW kurulu gücünde 609 adet akarsu santrali ve 23.275 MW gücünde 141 adet barajlı hidroelektrik santral bulunmaktadır. Hidrolik kurulu gücünün %56'sı, barajlı kurulu gücünün %41'i özel sektöre aittir.

Ülkemizin hidroelektrik üretim kapasitesi genelde yurdumuzun doğu kesimlerinde yoğunlaşmaktadır. Bu durum hidroelektrik enerjinin, elektrik sistem yönetimi ve dengelemedeki önemini artırmaktadır. Tüketimin fazla olduğu iller batı bölgesinde yer almaktadır. En önemli tüketim merkezi İstanbul'dur. İzmir, Bursa, Antalya ve Kocaeli gibi iller de yine tüketimin yoğun olduğu illerdir. (Şekil 4)

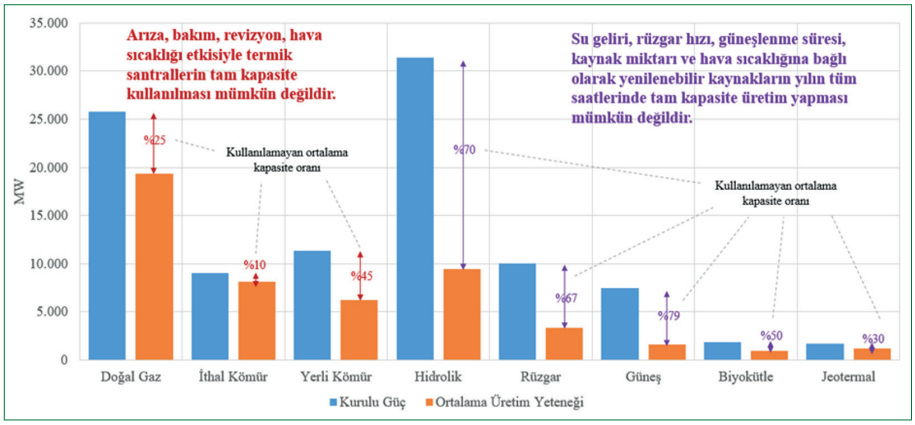



***Şekil 4.*** *Akarsu/barajlı hidroelektrik santrallerin kurulu güç dağılımı (TEİAŞ, 2022)*

Hidrolik enerji, kurak ve sulak mevsim durumuna göre yıllık elektrik üretiminin önemli bir bölümünü karşılayabilmektedir. Elektrik üretimi amaçlı kullanımının yanı sıra hidrolik santraller özellikle Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) kapsamında tarımsal sulama ihtiyacını karşılamada, feyezan dönemlerinde artan su seviyelerinin kontrollü bir şekilde depolanması neticesinde sel ve taşkın etkisinden yerleşim yerleri ve tarım alanlarının korunmasında, barajlar vasıtasıyla içme ve kullanma suyunun temininde, balıkçılık faaliyetleri yapılmasına imkan sağlayarak ülkemizde istihdam alanı sağlamakta ayrıca turizm, ulaşım ve çeşitli spor faaliyetlerinde de kullanılmaktadır. Bu nedenle hem elektrik arz güvenliği hem de diğer faaliyetler göz önüne alındığında hidrolik enerjinin etkin ve verimli bir şekilde kullanılması büyük önem arz etmektedir.

Elektrik sisteminde kurulu güç değeri üretim anlamı taşımamaktadır. Santrallerin arıza ya da bakımda olması, tesislerin yaşlanması ve sıcaklık etkisi ile verimlilik kaybı, şebeke kısıtı ve kaynak yetersizliği gibi nedenler kurulu gücün tam kapasite kullanımını engellemektedir. Çeşitli sebeplerle devre dışı kalan santrallerin sistemden çıkması ile üretim yeteneği olan kullanılabilir kapasite oluşmaktadır.

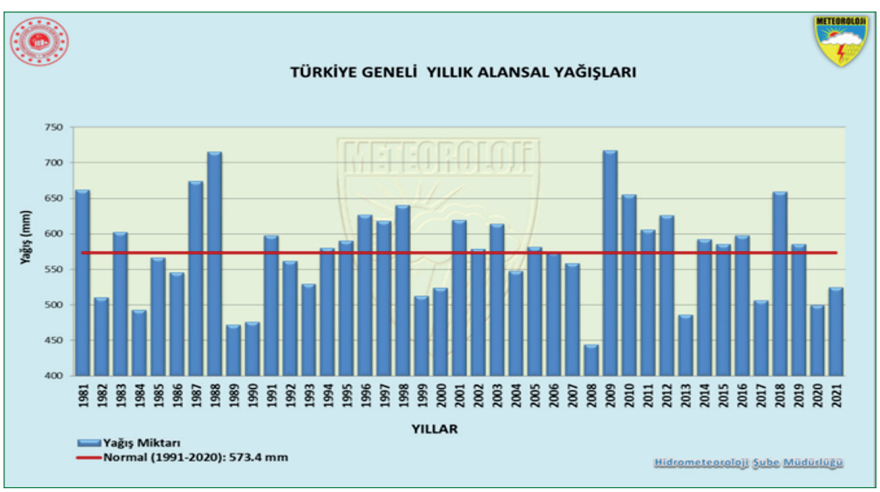
Şekil 5'te görüleceği üzere kurulu güce göre en yüksek ortalama üretim yeteneğine ithal kömür santralleri sahipken doğal gaz, yerli kömür, rüzgâr ve güneş gibi kaynaklarda bu oran düşmektedir. Hidrolik kaynaklarda ise yıllık ortalamada kurulu gücün neredeyse %70'i çalışmazken %30'luk kısmı emre amade kapasite olarak sistemde yer almaktadır. Kuraklık hidroelektrik santrallerin çalışma rejimlerini etkilemektedir. 2020 ve 2021 yıllarında yaşanan kuraklık nedeni ile uzun yıllar ortalama hidrolik üretimi 83 milyar kilowat saat (kWh)'ten 56 milyar kWh'e düşmüştür. 27 milyar kWh'lik açığın başka kaynaklardan üretilmesi gerekmiştir. Sistemde kesintili kaynakların yönetilmesi ancak baz yük olarak çalışan santrallerle olabilmektedir.




***Şekil 5.*** *Santrallerin kurulu güç ve ortalama kapasite kullanımı. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB,2022a)*

## 4. Hidroelektrik Üretim ve Mevsimsellik İlişkisi

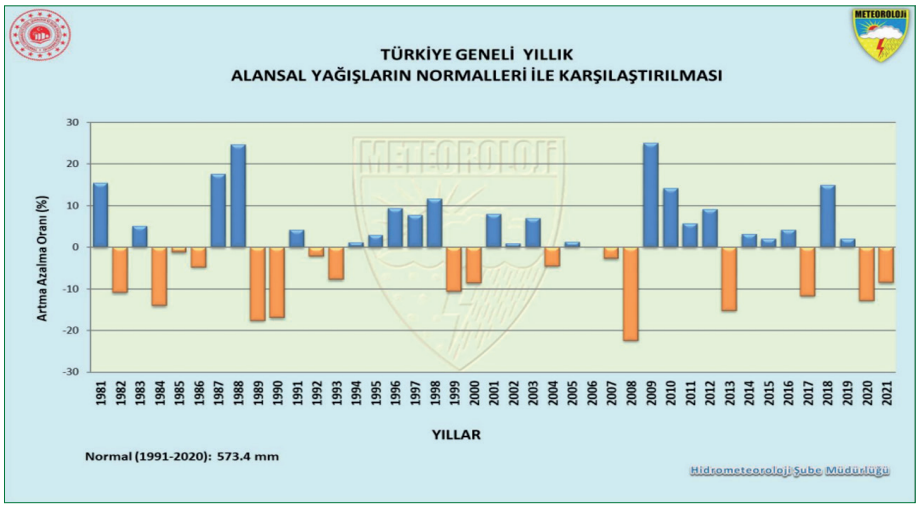
Türkiye geneli yıllık alansal yağışların uzun yıllar ortalaması 573,4 mm/yıl'dır. Yıllık alansal yağış ortalamalarına bakıldığında 2008, 2013, 2017, 2020 ve 2021 yılları mevsim normallerinin altında gerçekleşmiştir. Bu yıllar ve takip eden yılda feyezan döneminde kuraklık etkisinden dolayı beklenen suların gelmemesi neticesinde elektrik üretiminde hidroelektrik enerji payında dramatik düşüşler gerçekleşmiştir. (Şekil 6)




***Şekil 6.*** *Türkiye geneli yıllık alansal yağışları (Erkan vd., 2022)*

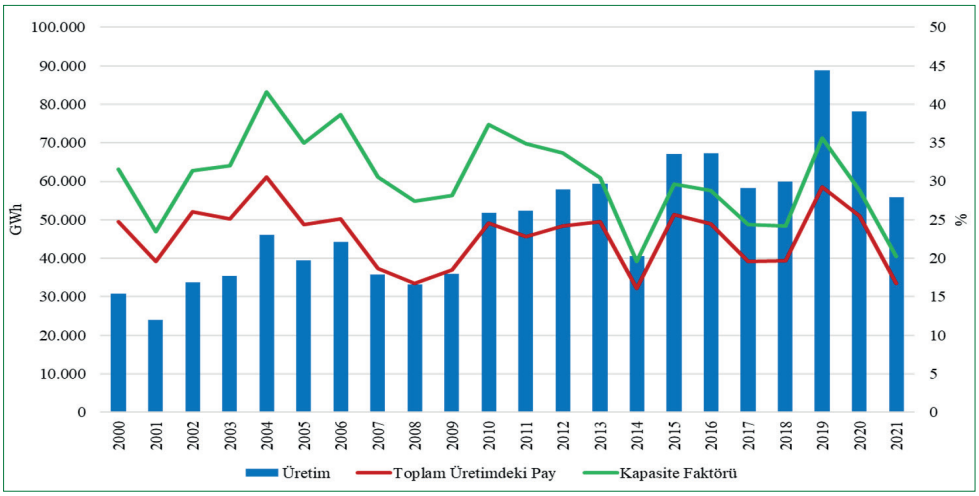
Ülkemizin de içerisinde yer aldığı Akdeniz Havzası, küresel iklim değişikliğine karşı yerkürenin en hassas bölgelerinden birisidir. Akdeniz Havzası'nda gerçekleşecek 2°C'lik bir sıcaklık artışının, beklenmeyen hava olayları, sıcak hava dalgaları, orman yangınlarının sayısında ve etkisinde artış, kuraklık ve bunlar dolayısıyla biyolojik çeşitlilik kaybı, tarımsal verim kaybı ve en önemlisi kuraklık olarak etkilerini hissettirmesi beklenmektedir.

Türkiye geneli yıllık alansal yağışların normalleri ile karşılaştırıldığında 2020 ve 2021 yılı yağışları normallerin altında kalmıştır. Yaklaşık yedi yılda bir kuraklık döngüsü yaşanan ülkemizde son yedi yıllık periyotta birden fazla kuraklık yaşanmıştır. (Şekil 7)



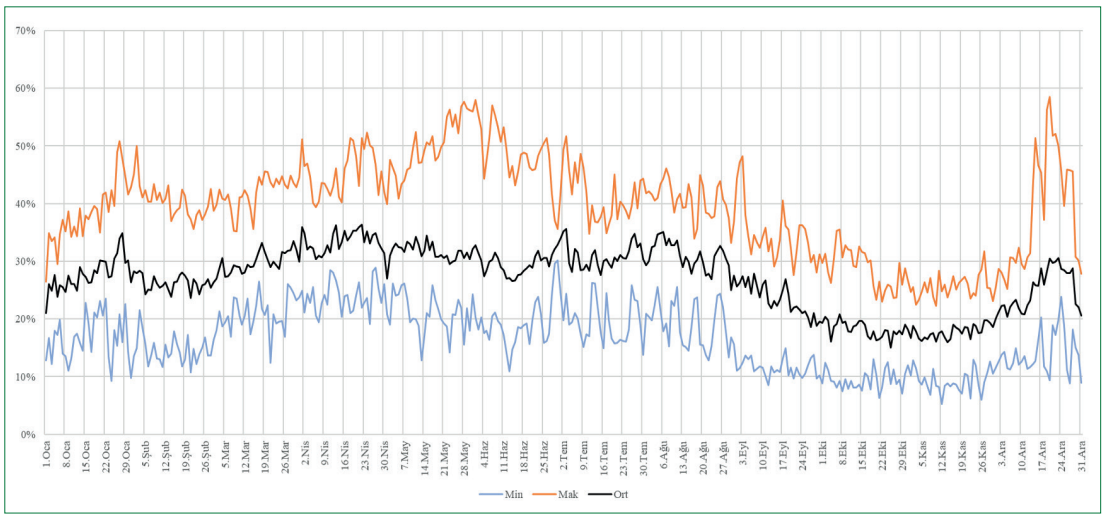

***Şekil 7.*** *Türkiye geneli yıllık alansal yağışların normalleri ile karşılaştırılması (Erkan vd., 2022)*

Yaşanan kuraklık hidrolik kaynaklı elektrik üretimine doğrudan yansımaktadır. Şekil 8'de yıllara göre hidrolik kaynaklı elektrik üretimi ve hidrolik santrallerin kapasite faktörüne ilişkin bilgiler yer almaktadır. 2001 yılından bu yana santrallerin yıllık kullanım oranını gösteren kapasite faktörünün %20 ile %41 arasında gerçekleştiği görülmektedir. Örneğin 2019 yılı son yılların en yağışlı yılı olarak kayda geçmiş olup bu yıldaki üretim 88.823 TWh'e ulaşmıştır. 2021 yılında ise hidrolik kaynaklı üretim yağışların azalması ile birlikte 55.927 TWh'e gerilemiştir.



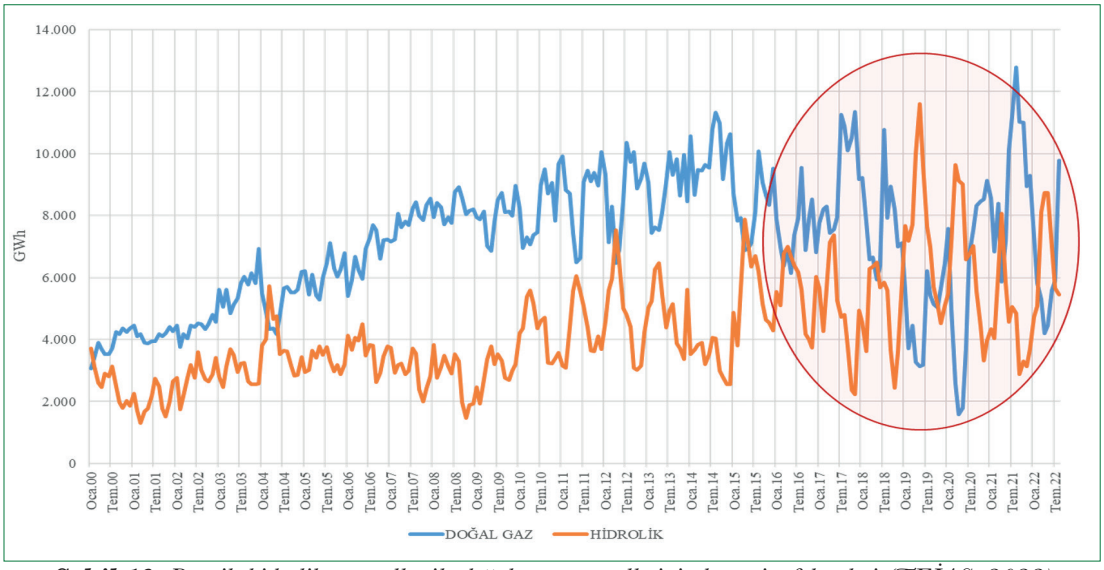

***Şekil 8.*** *Hidrolik santrallerde üretim ve kapasite faktörünün yıllara göre değişimi (TEİAŞ, 2022)*

Barajlı hidrolik santrallerin günlük kapasite faktörü maksimumda %60'lara ulaşırken minimumda %7-8'lere kadar düşmektedir. Ortalamada feyezan döneminde Nisan-Mayıs aylarında barajlı hidrolik santrallerin kapasite faktörü değerlerinde artış görülmektedir. Yazın hidrolik üretime ihtiyaç duyulurken son dönemlerde kış döneminde hidrolik elektrik yoğun şekilde kullanılmaktadır. (Şekil 9)



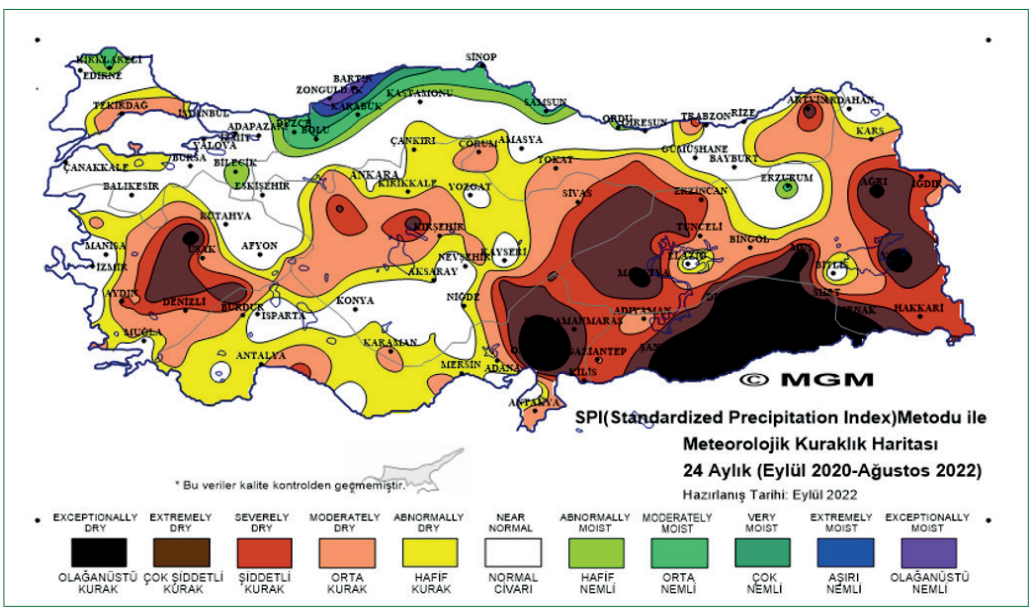

***Şekil 9.*** *Barajlı hidrolik santrallerin kapasite faktörü (TEİAŞ, 2022)*

Hidrolik santraller ile doğal gaz santralleri elektrik üretiminde son dönemde birbirini tamamlayıcı rol oynamaktadır. 2015 yılına kadar birlikte artış yaşanırken bu yıldan sonra birbirlerini ikame etme yönünde çalışmaya devam ettikleri görülmektedir. Hidroelektrik tarafında üretim az ise doğal gaz santrallerinde üretim artmaktadır. Son iki senedir bu şekilde bir çalışma rejimi izlenirken suyun tutulması gerektiği zamanlarda doğal gaz santralleri çalışmıştır. Hidroelektrik santrallerin elektrik sistemine en büyük katkısı barajlarda suyun biriktirilebilmesi ile ihtiyaç duyulan zamanlarda üretime destek vermesi, diğer kaynaklardan üretim yapıldığında suyun depolanarak tutulabilmesidir. (Şekil 10)




***Şekil 10.*** *Barajlı hidrolik santraller ile doğal gaz santrallerinin kapasite faktörleri (TEİAŞ, 2022)*

Türkiye iki yıllık kuraklık haritası incelendiğinde 2020 yılının Eylül ayından 2022 yılının ağustos ayına kadarki dönemde, yurdumuzun tamamında değişen şiddetlerde kuraklık yaşandığı görülmektedir. Özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesinin neredeyse tamamında olağanüstü ve çok şiddetli kuraklık yaşanırken Doğu Anadolu Bölgesi'nde çok şiddetli kuraklık yaşandığı, Ege Bölgesi'nin iç kesimlerinde çok şiddetli kuraklık yaşandığı, yurdumuzun geri kalan bölgelerinde ise normalleri civarında olduğu değerlendirilmektedir. (Şekil 11)




***Şekil 11.*** *Türkiye kuraklık haritası (2 yıllık). Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM,2022a)*

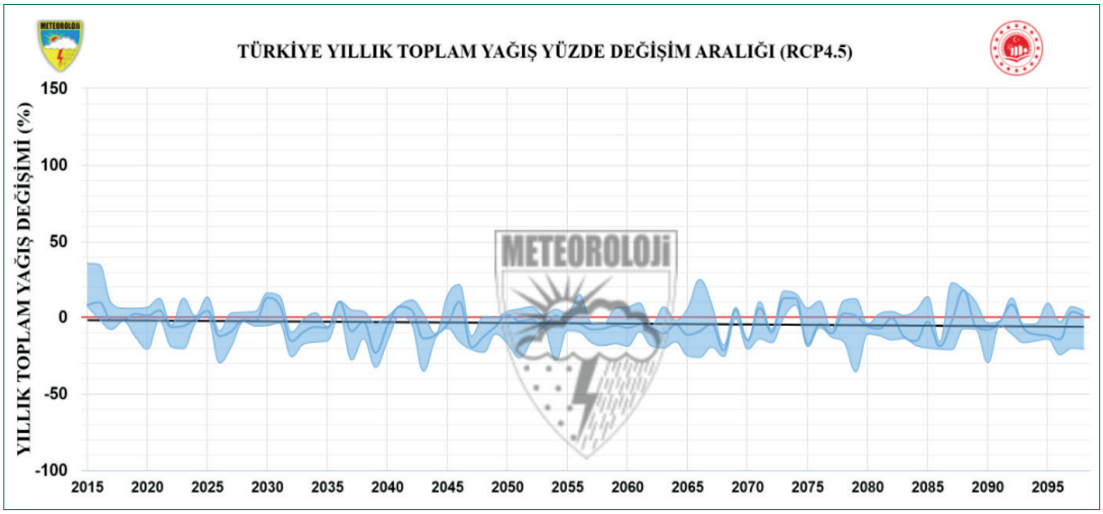
## 5. Kısa ve Uzun Dönemli Tahminler

Kısa dönemde, ulusal ve uluslararası kuruluşların tahminleri takip edilmektedir. On günlük tahminler genellikle tutarlı olurken altı aylık tahminlerde zaman zaman sapmalar yaşanmaktadır. Örneğin altı ay öncesinden çok yağışlı bir dönem tahmin edilirken, tahmin edilen ay döneminde kuraklık yaşanabilmektedir. Bu tarz değişiklikler hidroelektrik santrallerin elektrik sistemine vereceği katkıyı sürekli değiştirmektedir. Bu açıdan planlamaların iyi yapılması ve sürekli güncellenmesi gerekmektedir.

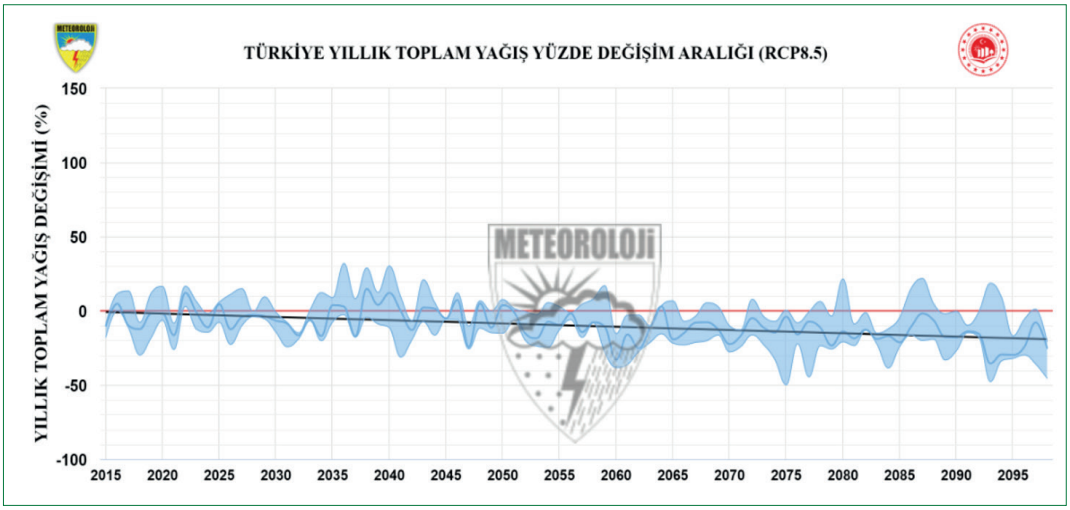
## 6. Yağış Projeksiyonları

Meteoroloji Genel Müdürlüğünün iklim projeksiyon göre, yağışlarda genel olarak azalma beklenmekle birlikte sürekli bir artış ya da azalış trendi olmadığı, bunun yanında yağış düzensizliklerinin artma eğiliminde olduğu Şekil 12 ve 13'te görülmektedir. Uzun vadede özellikle 2050 yılında Fırat ve Dicle Havzasında olması beklenen yağış azlığı hidroelektrik üretimini doğrudan etkileyecektir.

Temsili konsantrasyon rotası RCP4.5 senaryosuna göre 2016-2099 döneminde Türkiye yıllık toplam yağış anomalisinin ortalama olarak %3 ile %6 aralığında azalması beklenmektedir. Temsili konsantrasyon rotası RCP8.5 senaryosuna göre 2016-2099 döneminde Türkiye yıllık toplam yağış anomalisi değişiminin ortalama olarak %12 ile %3 aralığında olması beklenmektedir.




***Şekil 12.*** *Türkiye yıllık toplam yağış %değişim aralığı (RCP4.5) (MGM,2022b)*




***Şekil 13.*** *Türkiye yıllık toplam yağış %değişim aralığı (RCP8.5) (MGM, 2022b)*

## 7. İklim Değişikliği

Küresel ısınma atmosferin dünya yüzeyine yakın kısımlarında ortalama sıcaklığının doğal olarak ya da insan etkisiyle artması olarak tanımlanmaktadır. Dünya yüzeyinde sıcaklık bazı faktöre göre tayin edilmektedir. Bunlar; dünyanın aldığı güneş ışığı miktarı, dünyanın yansıttığı güneş ışığı miktarı, sıcaklığın atmosfer tarafından tutulması ve su buharının evaporasyonu ve yoğunlaşmasıdır.

Ayrıca, jeolojik kayıtlar, buzulların hacminde azalma, denizlerin yükselmesi, göllerdeki su sıcaklığının artışı, güncel ölçümler, matematiksel modeller ve aerosoller küresel ısınmayı gösteren kaynaklardır (Aksay vd., 2005).

İklim değişikliği çerçevesinde dünyada atılan adımlar şu şekilde ilerlemiştir; 1896 yılında sera gazlarının yüzey sıcaklıkları değişimine etkilerine dair ölçümler yapılmaya başlanmış, 1958 yılında Mauna Loa gözlemevinde $CO_2$ konsantrasyonu ölçümleri gerçekleştirilmiş, yıl 1969 olduğunda NASA tarafından asit yağmurlarının sera gazı etkileri üzerine araştırmalar yürütülmüş, 1979 yılında ise 1.İklim Kongresi gerçekleştirilmiştir. 1988 yılında Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) kurulmuş ardından 1992 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) imzaya açılmıştır. 1995 yılında Taraflar Konferansı (COP) toplantıları yapılmaya başlanmıştır. BMİDÇS'nin ilk uygulamam anlaşması niteliğinde olan Kyoto Protokolü, 1997 yılında kabul edilmiş olup 2005 yılında yürürlüğe girebilmiştir. 2020 sonrası iklim değişikliği rejiminin çerçevesini oluşturan Paris Anlaşması, 2015 yılında Paris'te düzenlenen BMİDÇS 21. Taraflar Konferansı'nda kabul edilmiştir. 4 Kasım 2016 itibariyle yürürlüğe giren Paris Anlaşması, kabulünün üzerinden bir yıl geçmeden yürürlüğe giren ilk küresel anlaşmadır.

Ülkmiz, 20 Eylül 2015 tarihinde, 2030 yılı itibariyle gerçekleşmesi öngörülen "Niyet Edilen Ulusal Katkı" beyanını %21'e varan artıştan azaltım olarak açıklamıştır. (*2015 yılında Paris Anlaşmasına henüz taraf olmadığımız için anılan beyan 'Niyet Edilen' olarak adlandırılmaktadır.)* Paris Anlaşması 7 Ekim 2021 tarihinde Cumhurbaşkanı Kararı ile onaylanmış olup, iç hukuk onay süreci tamamlanmıştır.

Paris Anlaşması, insan kaynaklı sera gazı salımlarının neden olduğu küresel sıcaklık artışını uzun vadede, sanayileşme öncesi döneme kıyasla 2 santigrat derecenin altıyla sınırlamayı hedeflemekte; bu konuda 1,5 santigrat dereceyi yakalamanın önemine dikkat çekmektedir. Bunun yanı sıra, Paris Anlaşmasıyla ülkelerin iklim değişikliğiyle mücadeleye ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar ve göreceli kabiliyetler ilkesi çerçevesinde katkıda bulunmaları hususu teyit edilmiştir (Paris Anlaşması, 2023).

Ülkemizin iklim değişikliği kapsamındaki ulusal vizyonu Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından yayınlanan Türkiye İklim Değişikliği Strateji Belgesi ile ortaya konulmuştur. Bu konuda ülkemiz ulusal vizyonu, iklim değişikliği politikalarını kalkınma politikalarıyla entegre etmiş; enerji verimliliğini yaygınlaştırmış; temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımını arttırmış; iklim değişikliğiyle mücadeleye özel şartları çerçevesinde aktif katılım sağlayan ve yüksek yaşam kalitesiyle refahı tüm vatandaşlarına düşük karbon yoğunluğu ile sunabilen bir ülke olmaktır.

Türkiye İklim Değişikliği Stratejisi (2010-2023) belgesinde Türkiye'nin iklim değişikliğiyle küresel mücadele kapsamındaki temel amacı, insanlığın ortak kaygısı olan iklim değişikliğini önlemeye yönelik uluslararası taraflarla işbirliği içerisinde, tarafsız ve bilimsel bulgular ışığında ortak akılla belirlenmiş küresel çabalara, sürdürülebilir kalkınma politikalarına uygun olarak, ortak fakat farklılaştırılmış sorumluluklar prensibi ve Türkiye'nin özel şartları çerçevesinde katılmak olarak ifade edilmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2010).

İklim değişikliği ile deniz seviyesinin yükselmesi, gezegensel sınırların değişmesi ve okyanus asidifikasyonunun artması beklenirken başta sulama ve tarım gibi birçok sektörün bu değişimlerden etkilenmesi beklenmektedir. Akdeniz iklim kuşağında yer alan ülkemizde ise küresel ısınma aynı şekilde devam ederse, Türkiye'nin yıllık ortalama sıcaklıklarında artış olması, ülkemizdeki yağış miktarının azalması ve yağışlarda düzensizliklerin görülmesi özellikle hidroelektrik kapasitenin yüksek olduğu Fırat-Dicle havzasının su gelirlerinde yaşanabilecek düşüşlerin yenilenebilir elektrik üretimini olumsuz etkileyeceği beklenmektedir.

## 8. Türkiye Ulusal Enerji Planı

Türkiye Ulusal Enerji Planı çalışması 6446 sayılı Elektrik Piyasası Kanunu'nun Arz Güvenliği başlıklı 20. maddesi ve 4646 sayılı Doğal Gaz Piyasası Kanunu Ek Madde 2 gereğince hazırlanmış olup çalışma ufku ülkemizin 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi esas alınarak 2035 yılına kadar olan dönemi kapsamaktadır.

Rapor hazırlanırken nüfus, ekonomik gelişim, yakıt fiyatları gibi temel göstergeler dikkate alınarak sanayi, mesken, hizmetler, tarım ve ulaştırma sektörlerinde enerji talebi, oluşturan sektörel aktiviteler tahmin edilmiştir.

Ülkelerin net sıfır emisyon hedeflerine ulaşabilmesi için birçok alternatif bulunmakla birlikte her alternatif farklı zorluklar içermektedir. Bu süreç, tüm sektörlerde büyük bir dönüşümü ve önceki dönemden farklı bir sistem bakışını gerektirmektedir.

Bu çalışma kapsamında Bakanlığımız tarafından hazırlanan planda 2020-2035 döneminde; birincil enerji tüketimi yaklaşık 205 milyon ton eşdeğer petrol (Mtep)'e yükselmekte, elektrik tüketimi yaklaşık 510 TWh'e ulaşmakta, elektrik enerjisinin nihai enerji tüketimi içindeki payı %24,9 oranına erişmekte, enerji yoğunluğu %35,3 oranında azalmakta, elektrik kurulu gücü toplamda yaklaşık 190 GW'a, güneş enerjisinde 52,9 GW'a, rüzgâr enerjisinde 29,6 GW'a ve nükleer enerjide 7,2 GW'a çıkmaktadır. Diğer yenilenebilir enerji kaynakları için kurulu güç hidroelektrik santrallerde orta-uzun dönemde 35,1 GW, jeotermal ve biyokütle enerji santrallerinde toplam 5,1 GW seviyesine yükselmektedir.

Mevcut durumda kurulu güç içinde en fazla paya sahip olan hidroelektrik santrallerin payı, maksimum kurulu güç potansiyeline yaklaşmış olmalarının ve toplam elektrik üretimindeki artışın etkisiyle hidroelektrik santrallerin toplam üretimdeki payı 2035 yılında %17,3 olmaktadır.

Elektrik üretiminde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %34,2'ye, yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %54,7'ye yükselmektedir. Ayrıca, elektrik kurulu gücünde kesintili yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %43,5'e, yenilenebilir enerji kaynaklarının payı %64,7'ye yükselmektedir.

2021-2035 döneminde devreye alınması gereken yeni kapasite miktarı 96,9 GW düzeyindedir. Beşer yıllık dönemler açısından 2021-2025 döneminde 21,6 GW, 2026-2050 döneminde 34,3 GW, 2031-2035 döneminde ise 41,0 GW gücünde yeni kapasitenin devreye alınması planlanmaktadır.

Söz konusu kurulu güç artışının, büyük çoğunluğu güneş ve rüzgâr enerjisi olmak üzere, %74,3'ü yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisi için yıllık yeni kapasite gereksinimi sırasıyla ortalama 3,1 ve 1,4 GW'tır. (ETKB, 2022b).

## 9. Sonuç

Bakanlığımızın strateji ve politikaları; enerji arz güvenliğinin sağlanması, enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi ve yerli/yenilenebilir kaynakların ekonomiye kazandırılması temellerine dayanmaktadır. Enerji kaynaklarımızı verimli ve çevreye duyarlı bir şekilde değerlendirerek ülke refahına en yüksek katkıyı sağlama misyonu çerçevesinde, enerjide ithalat bağımlılığını azaltma adına yerli ve yenilenebilir kaynaklarımızdan maksimum seviyede faydalanarak elektriğin kaliteli, sürekli, uygun maliyetli ve çevreye duyarlı bir şekilde tüketicilerin kullanımına sunulması doğrultusunda politikalar benimsenmektedir.

Hidrolik santraller, elektrik üretimi amaçlı kullanımının yanı sıra tarımsal sulama, sel ve taşkın kontrolü, içme suyunu karşılama, balıkçılık, turizm, ulaşım ve çeşitli spor faaliyetlerinde de kullanılmaktadır. Bu nedenle hem elektrik arz güvenliği hem de diğer faaliyetler göz önüne alındığında hidrolik enerjinin etkin ve verimli bir şekilde kullanılması büyük önem arz etmektedir. İklim değişikliğinin tüm dünyada olduğu gibi ülkemiz enerji sektörünün gidişatını da önemli derecede etkileyeceği aşikardır.

Önümüzdeki yıllarda iklim değişikliğinden dolayı ülkemizin yıllık ortalama sıcaklıklarında artış olması, ülkemizdeki yağış miktarının azalması ve yağışlarda düzensizliklerin görülmesi, özellikle hidroelektrik kapasitenin yüksek olduğu Fırat-Dicle havzasının su gelirlerinde yaşanabilecek düşüşlerin yenilenebilir kaynaklı elektrik üretimini olumsuz etkileyeceği beklenmektedir. Bu çerçevede hidroelektrik planlamasının yakından takip edilerek güncel durum ve tahminlere göre gerekli çalışmaların yapılması önerilmektedir.

## 10. Kaynaklar / References

Aksay, C.S., Ketenoğlu, O., Kurt, L. (2005). *Küresel Isınma ve İklim Değişikliği*. Selçuk Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Dergisi Sayı 25, s.29-41. https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/214946 Erişim tarihi: 28.03.2023

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2010). *Türkiye İklim Değişikliği Stratejisi 2010-2023*. https://webdosya.csb.gov.tr/db/iklim/editordosya/file/strateji%20belgesi/Turkiye%20Iklim%20Degisikligi%20Strateji%20Belgesi_TR.pdf Erişim tarihi: 28.03 2023

Dışişleri Bakanlığı (2023). Uluslararası Süreçler ve Türkiye. İklim Değişikliği İle Mücadele. *Paris Anlaşması*.

https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa Erişim tarihi: 08.03.2023

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2019). *2019-2023 Stratejik Plan.* https://sp.enerji.gov.tr/ETKB_2019_2023_Stratejik_Plani.pdf Erişim tarihi:28.03.2023

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2022a). Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. Yazarların kendi çalışması.

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2022b). *Türkiye Ulusal Enerji Planı*. https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf Erişim tarihi: 08.03.2023

Erkan, M.A., Odabaşı, E., Güser, Y., Çamalan, G., Akgündüz, A.S., Kılıç, G., Soydam, M. (2022). *2021 Yılı Meteorolojik Afetler Değerlendirmesi.* Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Araştırma Dairesi Başkanlığı, Meteorolojik Afetler Şube Müdürlüğü. Ankara. s.90. https://www.mgm.gov.tr/FILES/genel/raporlar/afetlerraporu2021.pdf Erişim tarihi:28.03.2023

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2022a). Kuraklık Analizi. Aylık Kuraklık Analizi. *24 Aylık Değerlendirme*. https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/kuraklik-analizi.aspx?d=aylik#sfB Erişim tarihi: Ocak 2023

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (2022b). Türkiye İçin İklim Projeksiyonları. *Türkiye Yıllık Toplam Yağış Yüzde Değişim Aralığı.* https://www.mgm.gov.tr/iklim/iklim-degisikligi.aspx?s=projeksiyonlar Erişim tarihi: 28.03.2023

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (2022). *Türkiye Elektrik Üretim-İletim 2021 Yılı İstatistikleri*. https://www.teias.gov.tr/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri Erişim tarihi: 28.03.2023

Uluslararası Enerji Ajansı (2022). *Ajans veri tabanı*. https://wds.iea.org/wds/Common/Login/Login.aspx Erişim tarihi: 28.03 2023

## Yazarlar Hakkında / About Authors

**Özgür SARHAN | Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı |**
**osarhan[at]enerji.gov.tr | ORCID: 0009-0009-3485-8033**
2010 yılında Bilkent Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünden mezun olduktan sonra kariyerine Elektrik Üretim Anonim Şirketi'nde Müfettiş Yardımcısı olarak başladı. Kamuya ait birçok santralin saha denetiminde yer aldıktan sonra Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Arz Güvenliği Dairesi Başkanlığında uzman yardımcısı olarak göreve başladı. 2017 Ağustos ayında "Elektrik Enerjisi Arz Güvenliğinin Bir Parçası Olarak Tüketici: Talep Tarafı Katılımı" başlıklı teziyle uzmanlığa atanan Sarhan, daha sonra sırasıyla Elektrik Grup Koordinatörü ve Daire Başkanı (V) olarak görev yaptı. 2019 Ocak ayından itibaren ise Enerji Arz Güvenliği, Piyasalar ve İstatistik Dairesi Başkanlığını sürdürmekte olup bu kapsamda enerji arz güvenliğinin izlenmesi, enerji politikalarının geliştirilmesi, enerji istatistiklerinin oluşturulması ve analiz raporlarının hazırlanması gibi konularda uzmanlaşmıştır. Sarhan, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yer Sistem Bilimleri Programı'nda enerji sistemlerinin dayanıklılığı konusu üzerine yüksek lisans çalışmalarına devam etmektedir.

**Özgür SARHAN | Ministry of Energy and Natural Resources |**
**osarhan[at]enerji.gov.tr | ORCID: 0009-0009-3485-8033**
After graduating from Bilkent University, Department of Industrial Engineering in 2010, he started his career at the State Electricity Generation Company of Türkiye as an assistant auditor. After taking roles in auditing many public power plants, he joined the Ministry of Energy and Natural Resources as an assistant specialist. He has been serving as the Head of Energy Security of Supply, Markets and Statistics Department since 2019. He specializes in monitoring energy security, preparing market analysis reports, developing long term energy policies and energy statistics. Sarhan continues his graduate studies on energy system resilience at Middle East Technical University.

**Tuğba ATLI | Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı |**
**tatli[at]enerji.gov.tr | ORCID: 0000-0002-4009-510X**
2008 yılında Hacettepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Çalışma hayatına 2010 yılında Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığında Müfettiş yardımcısı olarak başladı. Ardından 2013 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığında uzman yardımcısı olarak göreve başladı. Sırasıyla Maden İşleri Genel Müdürlüğü ve Enerji İşleri Genel Müdürlüğünde görev aldı. 2015 yılından beri Enerji Arz Güvenliği, Piyasalar ve İstatistik Dairesinde ETK Uzmanı olarak çalışmaktadır. Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği bölümünde yüksek lisans çalışmalarına devam etmektedir.

**Tuğba ATLI | Ministry of Energy and Natural Resources |**
**tatli[at]enerji.gov.tr | ORCID: 0000-0002-4009-510X**
She graduated from Hacettepe University Mining Engineering Department in 2008. She started her career in 2010 as an Assistant Inspector at the Ministry of Labor and Social Security. Then she started working as an assistant specialist at the Ministry of Energy and Natural Resources in 2013. She worked in the General Directorate of Mining Affairs and the General Directorate of Energy Affairs, respectively. She has been working as an ETK Specialist in the Department of Energy Supply Security, Markets and Statistics since 2015. She is continuing her graduate studies at Hacettepe University, Institute of Science and Technology, Mining Engineering department.

**Funda GÜNDOĞAN | Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı |**
**funda.gundogan[at]enerji.gov.tr | ORCID: 0009-0004-6440-8301**
2015 yılında İnönü Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Çalışma hayatına 2017 yılında TEDAŞ Genel Müdürlüğünde mühendis olarak başladı. Ardından 2021 yılında Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığında uzman yardımcısı olarak göreve başladı. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü Enerji Arz Güvenliği, Piyasalar ve İstatistik Dairesinde ETK Uzman Yardımcısı olarak çalışmaktadır. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünde yüksek lisans çalışmalarına devam etmektedir.

**Funda GÜNDOĞAN | Ministry of Energy and Natural Resources |**
**funda.gundogan[at]enerji.gov.tr | ORCID: 0009-0004-6440-8301**
She graduated from Inonu University, Department of Electrical and Electronics Engineering in 2015. She started her career as an engineer at TEDAŞ General Directorate in 2017. Then, she started to working as an assistant specialist at the Ministry of Energy and Natural Resources in 2021. She works as an ETK Assistant Specialist in the Department of Energy Supply Security, Markets and Statistics at the General Directorate of Energy Affairs. She continues her graduate studies at Gazi University, Institute of Science and Technology, Department of Electrical and Electronics Engineering.

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN İÇSU EKOSİSTEMLERİ VE SULAK ALANLAR ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ANALİZİ İÇİN BİR MODEL ÖNERİSİ

# PROPOSAL FOR A MODEL ANALYZING THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON INLAND AQUATIC AND WETLAND ECOSYSTEMS

*Ali ERTÜRK*

 DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch15

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN SULAK ALANLAR VE İÇSU EKOSİSTEMLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ANALİZİ İÇİN BİR MODEL ÖNERİSİ

***Ali ERTÜRK***
*İstanbul Üniversitesi*

**Özet**

İklim değişimi, son yıllarda etkisini önemli ölçüde hissettirmeye başlamış ve iklim değişikliğinin su kaynaklarına etkilerinin ortaya koyulması ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların çoğunluğunda öncelikli olarak su miktarlarındaki değişim üzerine odaklanılmış ve bu değişimler mümkün olduğunca sayısal olarak ortaya koyulmuştur. İklim değişiminin sulak alanlar ve içsu ekosistemlerine yıl içinde giren ortalama su miktarını ve su girdisinin mevsimlere göre dağılımını değiştirebileceğinden su ekosistemlerine önemli etkileri olması beklenmektedir. Havzalardan içsu ekosistemlerine giren su sıcaklığı ve kalitesinde değişimlerin de olması söz konusudur. Bununla birlikte hava sıcaklığındaki değişimler de su ekosistemlerinin su bütçesi ve su sıcaklığında değişimlere neden olarak su ekosistemlerini etkileyebilmektedir. Ekosistemlerdeki değişimler, ekosistemin dış etkenlere karşı tepkilerini de değiştireceğinden, mevcut veriler üzerinde yapılan regresyon analizi veya durağan zaman serisi analizi gibi istatistiksel yöntemler ile iklim değişiminin etkilerinin ortaya koyulmasında yetersiz kalacaktır. İklim değişimi sulak alanlar ve diğer içsu ekosistemleri için önemli bir baskı olabilmekle birlikte, su tüketimlerindeki değişimler (örneğin su çekimleri) ve sisteme ulaşan kirletici yüklerindeki değişimler gibi başka baskıların da altındadırlar. Bu nedenle de su ekosistemlerinin doğru yönetilmeleri için küresel bir baskı olan iklim değişiminin ve çoğunlukla yerel olan diğer baskıların su ekosistemlerine etkilerini ayrı ayrı ortaya koyabilen hesap yöntemleri ve araçların geliştirilmesi önemlidir. Bu bölümde bu amaçla geliştirilecek simülasyon modellerinin nitelikleri ortaya koyulacak ve bu nitelikler dikkate alınarak iklim değişiminin sulak alan ve içsu ekosistemleri üzerindeki etkilerinin diğer baskıların varlığında ayrı olarak ortaya koyabilen analitik bir simülasyon modeli önerilecektir.

***Anahtar Kelimeler***
*İçsu ekosistemleri, Sistem dinamiği, Simülasyon modelleri, Mekanizma tabanlı modeller, Analitik çözümler*

# PROPOSAL FOR A MODEL ANALYZING THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON WETLAND AND INLAND AQUATIC ECOSYSTEMS

***Ali ERTÜRK***
*Istanbul University*

**Abstract**

Climate change has begun to make its impact felt significantly in recent years and many studies have been conducted to reveal the effects of climate change on water resources. The majority of these studies focused primarily on the change in the amount of water and these changes were put forward numerically as much as possible. Climate change is expected to have significant effects on aquatic ecosystems as it may change the average amount of water entering wetlands and inland water ecosystems throughout the year and the seasonal distribution of water input. There are also changes in the temperature and quality of the water entering the inland water ecosystems from the basins. However, changes in air temperature can also affect aquatic ecosystems by causing changes in the water budget and water temperature of aquatic ecosystems. Since changes in ecosystems will also change the ecosystem's responses to external factors, statistical methods such as regression analysis or stationary time series analysis on existing data will be insufficient to reveal the effects of climate change. While climate change can be a significant pressure for wetlands and other inland water ecosystems, they are also under other pressures, such as changes in water consumption (for example water withdrawals) and changes in pollutant loads reaching the system. For this reason, it is important to develop calculation methods and tools that can separately reveal the effects of climate change, which is a global pressure, and other mostly local pressures on aquatic ecosystems for the correct management of aquatic ecosystems. In this chapter, the characteristics of the simulation models to be developed for this purpose will be revealed and by taking into account these characteristics an analytical simulation model will be proposed that can separately reveal the effects of climate change on wetland and inland water ecosystems in the presence of other pressures, taking into account these features.

***Keywords***
*Inland ecosystems, System dynamics, Simulation models, Mechanistic models, Analytical solutions*

## 1. Giriş

İklim değişimi, son yıllarda etkisini önemli ölçüde hissettirmeye başlamış ve iklim değişikliğinin su kaynaklarına etkilerinin ortaya koyulması ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. McBean ve Motiee, (2008) gibi birçok çalışmada hidroloji esaslı olmaları nedeniyle öncelikli olarak su miktarlarındaki değişim üzerine odaklanılmış ve bu değişimler mümkün olduğunca sayısal olarak ortaya koyulmuştur.

İklim değişiminin sulak alanlar ve içsu ekosistemlerine yıl içinde giren ortalama su miktarını ve su girdisinin mevsimlere göre dağılımını değiştirebileceğinden su ekosistemlerine önemli etkileri olması beklenmektedir. Havzalardan içsu ekosistemlerine giren su sıcaklığı ve kalitesinde değişimlerin de olması söz konusudur. Bununla birlikte hava sıcaklığındaki değişimler de su ekosistemlerinin su bütçesi ve su sıcaklığında değişimlere neden olarak su ekosistemlerini etkileyebilmektedir. Ekosistemlerdeki değişimler, ekosistemin dış etkenlere karşı tepkilerini de değiştireceğinden, mevcut veriler üzerinde yapılan regresyon analizi veya durağan zaman serisi analizi gibi istatistiksel yöntemler ile iklim değişiminin etkilerinin ortaya koyulmasında yetersiz kalacaktır.

İklim değişimi sulak alanlar ve diğer içsu ekosistemleri için önemli bir baskı olabilmekle birlikte, su tüketimlerindeki değişimler (örneğin su çekimleri) ve sisteme ulaşan kirletici yüklerindeki değişimler gibi başka baskıların da altındadırlar. Bu nedenle de su ekosistemlerinin doğru yönetilmeleri için küresel bir baskı olan iklim değişiminin ve çoğunlukla yerel olan diğer baskıların su ekosistemlerine etkilerini ayrı ayrı ortaya koyabilen hesap yöntemleri ve araçların geliştirilmesi önemlidir.

Bu bölümde bu amaçla geliştirilecek simülasyon modellerinin nitelikleri ortaya koyulacak ve bu nitelikler dikkate alınarak iklim değişiminin sulak alan ve içsu ekosistemleri üzerindeki etkilerinin diğer baskıların varlığında ayrı olarak ortaya koyabilen analitik bir simülasyon modeli önerilecektir. Bölümde ayrıca önerilen analitik simülasyon modelinin hayata geçirilmesi ile ilgili uygulama örneklerine de yer verilecek ve değişik örneklerin girdi verisi ihtiyaçları üzerinde de durulacaktır.

Su kalitesi modellemenin ilk yıllarında bilgisayar teknolojisi olmadığı ya da bilgisayarlar kolay ulaşılabilir olmadıkları için geliştirilen modeller de elle ya da masaüstü hesap makineleri ile işlem yapılarak sonuç verecek yapıdaydılar. Streeter ve Phelps (1925) ve Vollenwieder (1975) gibi doğrudan uygulanmış eski modeller ve Thomann ve Mueller (1987), Chapra (2008) gibi öğretim amaçlı ders kitaplarında verilen bazı modeller bunlara örnektir. Bu modeller, ya analitik çözümlere dayanan (örneğin Streeter ve Phelps,1925) ya da regresyon analizi sonucu elde

edilen (örneğin Vollenwieder, 1975) matematiksel ifadeler olduklarından, dış etkilerin sistemin verdiği yanıtın karşılığı olan su kalitesini bilgisayar teknolojisinin nispeten erişilebilir olduğu 1960'lı yılların sonundan itibaren ise model geliştiricileri tarafından hem analitik çözümlerin matematiksel zorluklarından kurtaran hem de analitik çözümlerin mümkün olmadığı çoğu gerçek durumda da uygulanabilir olan sayısal çözüm tekniklerine dayalı modeller kullanılmaya başlanmıştır. Bu modellerin tüm avantajlarına rağmen önemli dezavantajları vardır. Hem sayısal teknikler kullanılarak fonksiyonel çözümler elde etmemeleri hem de doğrusal olmayan yapıları nedeniyle odaklanılan su ekosisteminin girdileri ile çıktıları arasında kesintisiz bir çözüm vermemektedirler. Bu durum değişik etkenlerin su ekosistemleri üzerindeki bireysel etkilerinin doğrudan ortaya koyulmasını hemen hemen imkânsız hale getirmekte, dolaylı olarak ortaya koyulabilmeleri için de ileri sayısal tekniklerinin kullanılmasını gerektirmektedir.

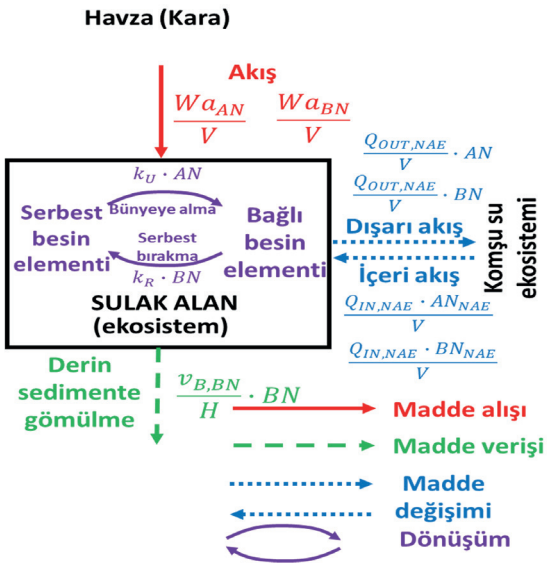
Bu bölümde, analitik çözümlerden esinlenilerek iklim değişikliği ve diğer etkenlerin su ekosistemlerine doğrudan etkilerini ortaya koyabilecek örnek modellerin yapıları üzerinde durulmuştur. Modeller sığ sulak alanlar için kurgulanmış olmakla birlikte, daha karmaşık yapılı su ekosistemlerine de uygulanmaları mümkündür.

## 2. Basit Bir Kütle Dengesi Modeli

Bu kısım; önerilen model yapısının mümkün olduğu kadar basit tanımlanan bir su ekosistemi için tüm ayrıntıları ile gösterilmesini amaçlamaktadır.

Örnek olarak verilen model kütle dengesine dayanan mekanizma ağırlıklı bir modeldir. Kütle dengesi, kütlenin korunumudur. Herhangi bir ekosisteme giren her atom madde (C, N, P gibi besin elementleri ya da kirleticiler) ya ekosistemin dışına taşınır ya da ekosistem içinde bir yerde bulunur. Ekosistem içindeki madde atom düzeyinde yok olmaz (atomlar ekosisteme girişteki orijinal moleküllerden farklı moleküllere geçebilir). Eğer söz konusu elementler besin elementleri ise, bu besin elementleri serbest (inorganik, çözünmüş, kullanılabilir) ya da bağlı (ölü organik maddeye bağlı ya da biyokütle içinde) durumda bulunabilirler.

Örnek olarak, bir sulak alan ekosisteminin kısıtlayıcı besin elementi üzerinden kurulan kütle dengesi verilmiştir. Ekosistem modeli kütle dengesi ile Şekil 1'de verilmektedir. Ekosistem konumsal olarak homojendir. Besin elementinin ise iki türü vardır. Serbest besin elementi (modelde AN ile gösterilmiştir) su ortamında bulunan ve birincil üreticiler tarafından doğrudan kullanılabilen besin elementi türüdür. Bağlı besin elementi ise (modelde BN ile gösterilmiştir) hem biyokütlede bulunan hem de organik madde içeriğinde (ölü biyokütle ve çözünmüş organik madde) bağlı olarak bulunan besin elementini temsil etmektedir. Ekosistemler çevrelerinden madde alırlar, çevrelerine madde verirler ya da taşınım ile madde değiş tokuş ederler. Ekosistemler maddeleri dönüştürebilirler.




$$\textbf{Serbest besin elementi açısından ekosistemin durumunda birim zamandaki değişim} = \textbf{Havzadan serbest besin elementi girişi} + \underbrace{\text{Komşu su ekosisteminden serbest besin elementi girişi} - \text{Komşu su ekosistemine serbest besin elementi çıkışı}}_{\text{Komşu su ekosistemi ile serbest besin elementi değişimi}} \underbrace{- \text{Serbest besin elementinin bünyeye alımı} + \text{Bağlı besin elementinin serbest bırakılması}}_{\text{Serbest besin elementlerini etkileyen dönüşümlerin tümü}}$$

$$\textbf{Bağlı besin elementi açısından ekosistemin durumunda birim zamandaki değişim} = \textbf{Havzadan bağlı besin elementi girişi} + \underbrace{\text{Komşu su ekosisteminden bağlı besin elementi girişi} - \text{Komşu su ekosistemine bağlı besin elementi çıkışı}}_{\text{Komşu su ekosistemi ile bağlı besin elementi değişimi}} - \textbf{Derin sedimente gömülerek ekosistem dışına bağlı besin elementi} \text{ çıkışı} \underbrace{+ \text{Serbest besin elementinin bünyeye alımı} - \text{Bağlı besin elementinin serbest bırakılması}}_{\text{Bağlı besin elementlerini etkileyen dönüşümlerin tümü}}$$

***Şekil 2.1*** *Basitleştirilmiş bir su ekosistemi ve kütle dengesi bileşenleri*

Serbest ve bağlı besin elementlerinin kütle dengelerinin matematiksel ifadeleri, sırasıyla Denklem 2.1 ve Denklem 2.2'de verilmiştir.

$$\underbrace{\frac{dAN}{dt}}_{\substack{\text{Serbest besin elementi açısından ekosistemin durumunda birim zamandaki değişim}}} = \underbrace{\frac{Wa_{AN}}{V}}_{\substack{\text{Havzadan serbest besin elementi girişi}}} + \underbrace{\underbrace{\frac{Q_{IN,NAE} \cdot AN_{NAE}}{V}}_{\substack{\text{Komşu su ekosisteminden serbest besin elementi girişi}}} - \underbrace{\frac{Q_{OUT,NAE}}{V} \cdot AN}_{\substack{\text{Komşu su ekosistemine serbest besin elementi çıkışı}}}}_{\substack{\text{Komşu su ekosistemi ile serbest besin elementi değişimi}}} - \underbrace{\underbrace{k_U \cdot AN}_{\substack{\text{Serbest besin elementinin bünyeye alımı}}} + \underbrace{k_R \cdot BN}_{\substack{\text{Bağlı besin elementinin serbest bırakılması}}}}_{\substack{\text{Serbest besin elementlerini etkileyen dönüşümlerin tümü}}} \quad \text{(Denklem 2.1)}$$

$$\underbrace{\frac{dBN}{dt}}_{\substack{\text{Bağlı besin elementi açısından ekosistemin durumunda birim zamandaki değişim}}} = \underbrace{\frac{Wa_{BN}}{V}}_{\substack{\text{Havzadan bağlı besin elementi girişi}}} + \underbrace{\underbrace{\frac{Q_{IN,NAE} \cdot BN_{NAE}}{V}}_{\substack{\text{Komşu su ekosisteminden bağlı besin elementi girişi}}} - \underbrace{\frac{Q_{OUT,NAE}}{V} \cdot BN}_{\substack{\text{Komşu su ekosistemine bağlı besin elementi çıkışı}}}}_{\substack{\text{Komşu su ekosistemi ile bağlı besin elementi değişimi}}} - \underbrace{\frac{v_{B,BN}}{H} \cdot BN}_{\substack{\text{Derin sedimente gömülerek ekosistem dışına bağlı besin elementi çıkışı}}} + \underbrace{\underbrace{k_U \cdot AN}_{\substack{\text{Serbest besin elementinin bünyeye alımı}}} - \underbrace{k_R \cdot BN}_{\substack{\text{Bağlı besin elementinin serbest bırakılması}}}}_{\substack{\text{Bağlı besin elementlerini etkileyen dönüşümlerin tümü}}} \quad \text{(Denklem 2.2)}$$

Denklem 2.1 ve Denklem 2.2'deki ifadeler aşağıda verilmektedir.

| | |
|---|---|
| $AN(t)$ | : Birim hacimdeki ya da birim alandaki serbest besin elementi miktarı ($[M \cdot L^{-3}]$) |
| $BN(t)$ | : Birim hacimdeki ya da birim alandaki bağlı besin elementi miktarı ($[M \cdot L^{-3}]$) |
| $t$ | : Zaman [T] |
| $V$ | : Hacim [$L^3$] |
| $H$ | : Derinlik [L] |
| $Wa_{AN}$ | : Kara kökenli serbest besin elementi yükü ($[M \cdot T^{-1}]$) |
| $Wa_{BN}$ | : Kara kökenli serbest besin elementi yükü ($[M \cdot T^{-1}]$) |
| $Q_{OUT,\ NAE}$ | : Komşu su ekosistemine çıkış akımı ($[L^3 \cdot T^{-1}]$) |
| $Q_{OUT,\ NAE}$ | : Komşu su ekosisteminden giriş akımı ($[L^3 \cdot T^{-1}]$) |
| $AN_{NAE}$ | : komşu su ekosistemindeki serbest besin elementi konsantrasyonu ($[M \cdot L^{-3}]$) |
| $BN_{NAE}$ | : komşu su ekosistemindeki bağlı besin elementi konsantrasyonu ($[M \cdot L^{-3}]$) |
| $V_{B,\ BN}$ | : Gömülme hızı ($[L \cdot T^{-1}]$) |
| $k_U$ | : Serbest besin elementinin bünyeye alınma hızı sabiti ($[T^{-1}]$) |
| $k_R$ | : Bağlı besin elementinin bırakılma hızı sabiti ($[T^{-1}]$) |

Denklem 2.1 ve Denklem 2.2 düzenlenerek Denklem 2.3 ve Denklem 2.4 elde edilir.

$$\frac{dAN}{dt} = \underbrace{-\left(\frac{Q_{OUT,NAE}}{V} + k_U\right)}_{a_{AN,AN}} \cdot AN + \underbrace{k_R}_{a_{AN,BN}} \cdot BN + \underbrace{\frac{Wa_{AN}}{V} + \frac{Q_{IN,SEA} \cdot AN_{NAE}}{V}}_{W_{AN}} \quad \text{(Denklem 2.3)}$$

$$\frac{dBN}{dt} = \underbrace{k_U}_{a_{BN,AN}} \cdot AN \underbrace{-\left(\frac{Q_{OUT,NAE}}{V} + \frac{v_{S,BN}}{H} + k_R\right)}_{a_{BN,BN}} \cdot BN + \underbrace{\frac{Wa_{BN}}{V} + \frac{Q_{IN,NAE} \cdot BN_{NAE}}{V}}_{W_{BN}} \quad \text{(Denklem 2.4)}$$

Denklem 2.3 ve Denklem 2.4'te verilen kısaltma tanımları $a_{AN,AN}$, $a_{AN,BN}$, $a_{BN,AN}$, $a_{BN,BN}$, $W_{AN}$ ve $W_{BN}$kullanılarak elde edilen diferansiyel denklem takımı (Denklem 2.5 ve Denklem 2.6) matris biçiminde yazılarak Denklem 2.7 elde edilir.

$$\frac{dAN}{dt} = a_{AN,AN} \cdot AN + a_{AN,BN} \cdot BN + W_{AN} \quad \text{(Denklem 2.5)}$$

$$\frac{dAN}{dt} = a_{AN,AN} \cdot AN + a_{AN,BN} \cdot BN + W_{AN} \quad \text{(Denklem 2.6)}$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} AN \\ BN \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} a_{AN,AN} & a_{AN,BN} \\ a_{BN,AN} & a_{BN,BN} \end{bmatrix}}_{\substack{\text{Ekosistemin dış etkilere} \\ \text{gösterdiği tepkisel davranışı} \\ \text{temsil eden tepki matrisi}}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} AN \\ BN \end{bmatrix}}_{\substack{\text{Ekosistemin} \\ \text{durumunu} \\ \text{temsil eden çözüm} \\ \text{vektörü}}} + \underbrace{\begin{bmatrix} W_{AN} \\ W_{BN} \end{bmatrix}}_{\substack{\text{Ekosisteme olan} \\ \text{dış etkileri temsil} \\ \text{eden sabitler} \\ \text{vektörü}}} \quad \text{(Denklem 2.7)}$$

Denklem 2.7 kararlı durum[1] için Denklem 2.8'e dönüşmektedir.

$$-\begin{bmatrix} a_{AN,AN} & a_{AN,BN} \\ a_{BN,AN} & a_{BN,BN} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} AN \\ BN \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{AN} \\ W_{BN} \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem 2.8)}$$

Çözümü ise, iki tarafın negatif tepki matrisinin tersi ile çarpılması ile elde edilir (Denklem 2.9).

$$\begin{bmatrix} AN \\ BN \end{bmatrix} = inv\left(-\begin{bmatrix} a_{AN,AN} & a_{AN,BN} \\ a_{BN,AN} & a_{BN,BN} \end{bmatrix}\right) \cdot \begin{bmatrix} W_{AN} \\ W_{BN} \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem 2.9)}$$

Negatif tepki matrisinin tersinin elde edilişi Denklem 2.10'da verilmektedir.

[1] *Bu terim çevre bilimleri ve mühendisliğinde zamana göre değişken olmayan dış etkenlerin yeterince uzun süre etkisi altında sistemin tepkisinin de zamana göre değişken olmadığı durum yerine kullanılmıştır. Modelleme jargonunda sistemin stabil olduğunu ifade eden kararlı durum ile bir ilişkisi yoktur.*

$$inv\left(-\begin{bmatrix} a_{AN,AN} & a_{AN,BN} \\ a_{BN,AN} & a_{BN,BN} \end{bmatrix}\right) = -\frac{\begin{bmatrix} a_{BN,BN} & -a_{AN,BN} \\ -a_{BN,AN} & a_{AN,AN} \end{bmatrix}}{det\left(\begin{bmatrix} a_{AN,AN} & a_{AN,BN} \\ a_{BN,AN} & a_{BN,BN} \end{bmatrix}\right)} = \quad \text{(Denklem 2.10)}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{-a_{BN,BN}}{a_{AN,AN}\cdot a_{BN,BN} - a_{AN,BN}\cdot a_{BN,AN}} & \frac{a_{AN,BN}}{a_{AN,AN}\cdot a_{BN,BN} - a_{AN,BN}\cdot a_{BN,AN}} \\ \frac{a_{BN,AN}}{a_{AN,AN}\cdot a_{BN,BN} - a_{AN,BN}\cdot a_{BN,AN}} & \frac{-a_{AN,AN}}{a_{AN,AN}\cdot a_{BN,BN} - a_{AN,BN}\cdot a_{BN,AN}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mia_{AN,AN} & mia_{AN,BN} \\ mia_{BN,AN} & mia_{BN,BN} \end{bmatrix}$$

Bu durumda serbest ve bağlı besin elementleri için elde edilecek çözümler Denklem 2.11 ve Denklem 2.12'de gösterildiği biçimdedir.

$$AN = mia_{AN,AN}\cdot W_{AN} + mia_{AN,BN}\cdot W_{BN} \quad \text{(Denklem 2.11)}$$

$$BN = mia_{BN,AN}\cdot W_{AN} + mia_{BN,BN}\cdot W_{BN} \quad \text{(Denklem 2.12)}$$

Denklem 2.11 ve Denklem 2.12'den de görüldüğü gibi sistem kararlı duruma ulaştığında serbest ve bağlı besin elementi konsantrasyonları ile temsil eden durumu yalnızca serbest ve bağlı besin elementi yükleri ile temsil edilen dış etkenlere bağlıdır. Sistem girdisi ve çıktısı arasındaki, bağlantı ise tepki matrisi tarafından sağlanmaktadır. Aynı denklemler, ekosistemin tepkisinin dış etkiler ile dengede olduğu duruma ulaştığını göstermektedir (Şekil 2.2). Şekilden de anlaşılabileceği gibi bu türdeki analitik modeller yalnızca sistemin durumunu temsil eden değişkenleri değil (bu modelde serbest ve bağlı besin elementi konsantrasyonları) değişkenler ile ilgili taşınım ve dönüşüm proseslerinin bireysel katkılarını da ortaya koymaktadırlar.

$$\underbrace{\underbrace{\underbrace{\frac{Wa_{AN}}{V}}_{\text{Havzadan serbest besin elementi girişi}} + \underbrace{\frac{Q_{IN,NAE}\cdot AN_{NAE}}{V}}_{\text{Komşu su ekosisteminden serbest besin elementi girişi}}}_{\text{EKOSİSTEME SERBEST BESİN ELEMENTİ ÜZERİNDEN DIŞ ETKİ}} = \underbrace{\underbrace{\frac{Q_{OUT,NAE}}{V}\cdot AN}_{\text{Komşu su ekosistemine serbest besin elementi çıkışı}} + \underbrace{k_U\cdot AN}_{\text{Serbest besin elementinin bünyeye alımı}} - \underbrace{k_R\cdot BN}_{\text{Bağlı besin elementinin serbest bırakılması}}}_{\text{EKOSİSTEMİN TEPKİSİNİN SERBEST BESİN ELEMENTİ ÜZERİNDEN EKOSİSTEM DURUMUNA YANSIMASI}}}_{\text{SERBEST BESİN ELEMENTİ İÇİN EKTİ=TEPKİ}}$$

$$\underbrace{\underbrace{\underbrace{\frac{Wa_{BN}}{V}}_{\text{Havzadan bağlı besin elementi girişi}} + \underbrace{\frac{Q_{IN,NAE}\cdot BN_{NAE}}{V}}_{\text{Komşu su ekosisteminden bağlı besin elementi girişi}}}_{\text{EKOSİSTEME BAĞLI BESİN ELEMENTİ ÜZERİNDEN DIŞ ETKİ}} = \underbrace{\underbrace{\frac{Q_{OUT,NAE}}{V}\cdot BN}_{\text{Komşu su ekosistemine bağlı besin elementi çıkışı}} + \underbrace{\frac{v_{B,BN}}{H}\cdot BN}_{\text{Derin sedimente gömülerek ekosistem dışına bağlı besin elementi çıkışı}} - \underbrace{k_U\cdot AN}_{\text{Serbest besin elementinin bünyeye alımı}} + \underbrace{k_R\cdot BN}_{\text{Bağlı besin elementinin serbest bırakılması}}}_{\text{EKOSİSTEMİN TEPKİSİNİN SERBEST BESİN ELEMENTİ ÜZERİNDEN EKOSİSTEM DURUMUNA YANSIMASI}}}_{\text{BAĞLI BESİN ELEMENTİ İÇİN EKTİ=TEPKİ}}$$

$$mia_{AN,AN} = \frac{-a_{BN,BN}}{a_{AN,AN} \cdot a_{BN,BN} - a_{AN,BN} \cdot a_{BN,AN}} \qquad a_{AN,AN} = -\left(\frac{Q_{OUT,NAE}}{V} + k_U\right) \qquad a_{AN,BN} = k_R$$

$$mia_{AN,BN} = \frac{a_{AN,BN}}{a_{AN,AN} \cdot a_{BN,BN} - a_{AN,BN} \cdot a_{BN,AN}} \qquad a_{BN,AN} = k_U \qquad a_{BN,BN} = -\left(\frac{Q_{OUT,NAE}}{V} + \frac{v_{B,BN}}{H} + k_R\right)$$

$$mia_{BN,AN} = \frac{a_{BN,AN}}{a_{AN,AN} \cdot a_{BN,BN} - a_{AN,BN} \cdot a_{BN,AN}} \qquad W_{AN} = \frac{Wa_{AN}}{V} + \frac{Q_{IN,NAE} \cdot AN_{NAE}}{V}$$

$$mia_{BN,BN} = \frac{-a_{AN,AN}}{a_{AN,AN} \cdot a_{BN,BN} - a_{AN,BN} \cdot a_{BN,AN}} \qquad W_{BN} = \frac{Wa_{BN}}{V} + \frac{Q_{IN,NAE} \cdot BN_{NAE}}{V}$$

*Ekosistem içindeki* ***serbest besin elementinin*** *komşu su ekosistemine akışı* $= \frac{Q_{OUT,MAE}}{V} \cdot \left(\boldsymbol{mia_{AN,AN} \cdot W_{AN} + mia_{AN,BN} \cdot W_{BN}}\right)$

*Ekosistem içindeki* ***bağlı besin elementinin*** *komşu su ekosistemine akışı* $= \frac{Q_{OUT,MAE}}{V} \cdot \left(\boldsymbol{mia_{BN,AN} \cdot W_{AN} + mia_{BN,BN} \cdot W_{BN}}\right)$

*Ekosistem içindeki* ***bağlı besin elementinin*** *sedimentte derine gömülme ile sistemden çıkışı* $= \frac{v_{B,BN}}{H} \cdot \left(\boldsymbol{mia_{BN,AN} \cdot W_{AN} + mia_{BN,BN} \cdot W_{BN}}\right)$

*Ekosistem içindeki* ***serbest besin elementinin*** *bünyeye alınması* $= k_U \cdot \left(\boldsymbol{mia_{AN,AN} \cdot W_{AN} + mia_{AN,BN} \cdot W_{BN}}\right)$

*Ekosistem içindeki* ***bağlı besin elementinin*** *serbest bırakılması* $= k_R \cdot \left(\boldsymbol{mia_{BN,AN} \cdot W_{AN} + mia_{BN,BN} \cdot W_{BN}}\right)$

***Şekil 2.2*** *Kararlı durum yaklaşımına göre etki-tepki ilişkileri*

Denklem 2.7'nin dinamik durum başka bir deyişle zamana göre değişken durumu için çözümü ise daha uzun ve karmaşıktır. Benzer biçimdeki diferansiyel denklem takımları için geçerli analitik çözüm gruplarının elde edilişi Ek-A'da verilmektedir. Ek-A'da verilen çözüm grubu elemanlarından geçerli olanı Denklem 2.7 üzerinde uygulandığında Denklem 2.13 ve Denklem 14'te verilen biçimlerde çözümler elde edilmektedir. Çözümlerdeki terimler, Denklem 2.15 – Denklem 2.28'de verilmiştir. Denklem 2.13 ve Denklem 2.14'ten de anlaşılabileceği çözümler hem başlangıç konsantrasyonunun hem de dış etkilerin fonksiyonudur.

$$AN(t) = AN_0 \cdot f_{AN,AN_0}(t) + BN_0 \cdot f_{AN,BN_0}(t) + W_{\mathrm{AN}} \cdot f_{AN,W_{AN}}(t) + W_{\mathrm{BN}} \cdot f_{AN,W_{BN}}(t) \qquad \text{(Denklem 2.13)}$$

$$\mathrm{BN}(t) = AN_0 \cdot f_{BN,AN_0}(t) + BN_0 \cdot f_{BN,BN_0}(t) + W_{\mathrm{AN}} \cdot f_{BN,W_{AN}}(t) + W_{\mathrm{BN}} \cdot f_{BN,W_{BN}}(t) \qquad \text{(Denklem 2.14)}$$

$$f_{AN,AN_0}(t) = \frac{a_{\mathrm{AN,AN}} - \lambda_{\mathrm{BN}}}{\lambda_{\mathrm{AN}} - \lambda_{\mathrm{BN}}} \cdot \left(exp(\lambda_{\mathrm{AN}} \cdot t) - exp(\lambda_{\mathrm{AN}} \cdot t)\right) + exp(\lambda_{\mathrm{AN}} \cdot t) \qquad \text{(Denklem 2.15)}$$

$$f_{AN,BN_0}(t) = \frac{\alpha_{AN,BN}}{\lambda_{AN} - \lambda_{BN}} \cdot \left(exp(\lambda_{AN} \cdot t) - exp(\lambda_{BN} \cdot t)\right) \qquad \text{(Denklem 2.16)}$$

$$f_{AN,W_{AN}}(t) = \frac{1+\lambda_{BN}\cdot \alpha'_{1,1}}{\lambda_{AN}-\lambda_{BN}}\cdot\left(exp(\lambda_{AN}\cdot t)-exp(\lambda_{BN}\cdot t)\right)+\alpha'_{AN,AN}\cdot\left(1-exp(\lambda_{BN}\cdot t)\right) \quad \text{(Denklem 2.17)}$$

$$f_{AN,W_{BN}}(t) = \frac{\lambda_{BN}\cdot \alpha'_{AN,BN}}{\lambda_{AN}-\lambda_{BN}}\cdot\left(exp(\lambda_{AN}\cdot t)-exp(\lambda_{BN}\cdot t)\right)+\alpha'_{AN,BN}\cdot\left(1-exp(\lambda_{BN}\cdot t)\right) \quad \text{(Denklem 2.18)}$$

$$f_{BN,AN_0}(t) = \frac{\alpha_{BN,AN}}{\lambda_{AN}-\lambda_{BN}}\cdot\left(exp(\lambda_{AN}\cdot t)-exp(\lambda_{BN}\cdot t)\right) \quad \text{(Denklem 2.19)}$$

$$f_{BN,BN_0}(t) = \frac{\alpha_{BN,BN}-\lambda_{BN}}{\lambda_{AN}-\lambda_{BN}}\cdot\left(exp(\lambda_{AN}\cdot t)-exp(\lambda_{BN}\cdot t)\right)+exp(\lambda_{BN}\cdot t) \quad \text{(Denklem 2.20)}$$

$$f_{BN,W_{AN}}(t) = \frac{\lambda_{BN}\cdot \alpha'_{BN,AN}}{\lambda_{AN}-\lambda_{BN}}\cdot\left(exp(\lambda_{AN}\cdot t)-exp(\lambda_{BN}\cdot t)\right)+\alpha'_{BN,AN}\cdot\left(1-exp(\lambda_{BN}\cdot t)\right) \quad \text{(Denklem 2.21)}$$

$$f_{BN,W_{BN}}(t) = \frac{1+\lambda_{BN}\cdot \alpha'_{BN,BN}}{\lambda_{AN}-\lambda_{BN}}\cdot\left(exp(\lambda_{AN}\cdot t)-exp(\lambda_{BN}\cdot t)\right)+\alpha'_{BN,BN}\cdot\left(1-exp(\lambda_{BN}\cdot t)\right) \quad \text{(Denklem 2.22)}$$

$$\lambda_{AN} = \frac{\alpha_{AN,AN}+\alpha_{AN,BN}}{2}+\frac{\sqrt{(k_U+k_R)^2+4\cdot k_R\cdot k_U}}{2} \quad \text{(Denklem 2.23)}$$

$$\lambda_{BN} = \frac{\alpha_{AN,AN}+\alpha_{AN,BN}}{2}-\frac{\sqrt{(k_U+k_R)^2+4\cdot k_R\cdot k_U}}{2} \quad \text{(Denklem 2.24)}$$

$$\alpha'_{AN,AN} = -\frac{\alpha_{BN,BN}}{\alpha_{AN,AN}\cdot\alpha_{BN,BN}-\alpha_{AN,BN}\cdot\alpha_{BN,AN}} \quad \text{(Denklem 2.25)}$$

$$\alpha'_{BN,AN} = \frac{\alpha_{AN,BN}}{\alpha_{AN,AN}\cdot\alpha_{BN,BN}-\alpha_{AN,BN}\cdot\alpha_{BN,AN}} \quad \text{(Denklem 2.26)}$$

$$\alpha'_{BN,BN} = -\frac{\alpha_{AN,AN}}{\alpha_{AN,AN}\cdot\alpha_{BN,BN}-\alpha_{AN,BN}\cdot\alpha_{BN,AN}} \quad \text{(Denklem 2.27)}$$

$$\alpha'_{AN,BN} = \frac{\alpha_{AN,BN}}{\alpha_{AN,AN}\cdot\alpha_{BN,BN}-\alpha_{AN,BN}\cdot\alpha_{BN,AN}} \quad \text{(Denklem 2.28)}$$

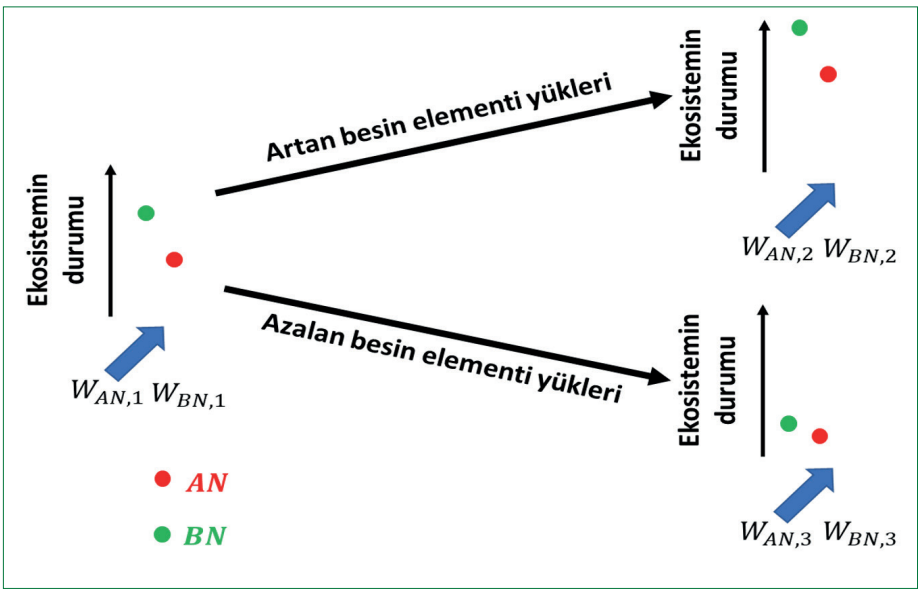
Bu denklemlerde $\lambda_{AN}$ ve $\lambda_{BN}$ sistemin katsayılar matrisinin özdeğerleridir.

Bu kısma kadar türetilen kütle dengesinin temel çıktıları aşağıda sıralanarak özetlenmiştir:

- Ekosistemin dış etkilere bir cevabı olarak durumu
- Tüm kalemlerin ayrı ayrı ve sayısal olarak ortaya koyulduğu besin elementi muhasebesi
  - Su ekosistemine havzasından giren besin elementi
  - Su ekosisteminden çıkan besin elementi
  - Su ekosisteminin komşu su ekosistemleri ile besin elementi giriş çıkışı
  - Su ekosisteminin içindeki besin elementi dönüşümleri

Bu çıktıların ikisi de su ekosistemlerinin mevcut durumlarının tanımlanması ve ilgili su ekosistemlerinin yönetilmesi için önemlidir. Ancak bu iki çıktının iki farklı yaklaşım ile (kararlı durum yaklaşımı ve dinamik yaklaşım) elde edildiği unutulmamalıdır. Bu nedenle, bu iki yaklaşımın da karşılaştırılarak farklarının ortaya koyulması gerekmektedir.

Kararlı durum yaklaşımı ekosistemin uzun süreli ortalama durumunu ve besin elementi bütçesini vermektedir. Sonuçlar ise yalnızca herhangi bir dış etken altında sistemin durumudur. Sonuçlarda zaman bilgisi yoktur (Şekil 2.3).

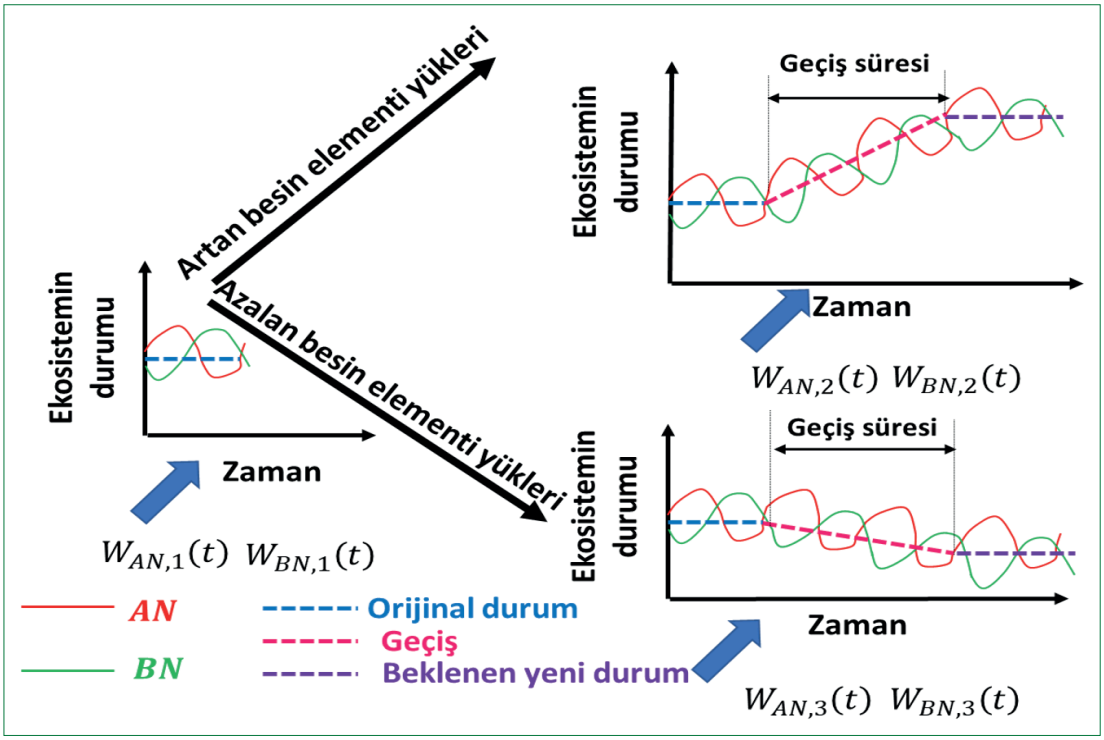



***Şekil 2.3*** *Kararlı durum yaklaşımı*

Kararlı durum analizinin ve elde edilen çıktıların temel özellikleri aşağıda sıralanmaktadır:

- Değişken dış koşullarda sistemin durumunda nasıl bir değişim beklenebileceğini verir.
- Değişimin sayısal büyüklüğünü de verebilir.
- Girdi ve çıktıları basittir ve analizin uygulanması nispeten kolaydır
- Ancak ekosistemin öngörülen duruma ne kadar sürede ulaşacağını vermemektedir. Bu nedenle bir su ekosisteminin dış etkenler altındaki davranışının öngörülmesi mümkündür ancak bunun ne kadar sürede gerçekleşeceği bilgisi elde edilememektedir.

Dinamik yaklaşım, ekosistem durumunun ve besin elementi bütçesini zaman serisi olarak verebilir. Sonuçlar ise yalnızca herhangi bir dış etken ve sistemin analize başlanılan andaki durumunun etkisi altında sistemin durumunun zamana göre fonksiyonudur (Şekil 2.4).




***Şekil 2.4*** *Dinamik yaklaşım*

Dinamik durum analizinin ve elde edilen çıktıların temel özellikleri aşağıda sıralanmaktadır:

- Kararlı durum yaklaşımından alınabilecek her çıktıyı verebilir, ancak sonuçların işlemden geçirilmesi gerekebilir.
- Ekosistemin mevsimsel-periyodik davranışını verebilir.
- Geçiş süresinin uzunluğunu verebilir.
- Ancak uygulanması kararlı durum yaklaşımından daha zordur, daha ayrıntılı matematiksel yöntemlerin uygulanmasını gerektirir[2] ve daha ayrıntılı girdi verisi gerektirir.[3]

[2] *Tüm çözüm sürecinin Denklem 2.8 – Denklem 2.12'de verilen kararlı durum çözümleri ile yalnızca sonuçların özetlendiği Denklem 2.13 – Denklem 2.28 ve çözüm sürecini ayrıntıları ile veren Ek-A karşılaştırıldığında burada vurgulanmak istenen anlaşılacaktır.*

[3] *Girdi verileri (örneğin çevresel koşullar ya da dışarıdan gelen besin elementi yükü) kararlı durum modellerinde olduğu gibi zaman üzerinden ortalaması alınmış değerler yerine zaman serileri olarak modele girilmelidir. Bu durumda, matematiksel çözümler Denklem 2.13 – Denklem 2.28 ve Ek-A'da gösterildiğinden daha da karmaşık hale gelebilmektedir.*

## 3. İklim Değişiminin Su Ekosistemlerine Etkilerinin Ortaya Koyulması

Bu kısım; bir önceki bölümde önerilen model yapısının[4] iklim değişiminin etkilerini de ortaya koyulmasını sağlayacak şekilde genişletilmesinin gösterilmesine ayrılmıştır. Gerek konunun anlatımını kolaylaştırmak gerekse bir kitap bölümü için mümkün olduğunca makul bir hacimde kalabilmek için, önerilen genişletmeler kararlı durum modeli üzerinde gösterilecektir.

İklim değişimi, yıllık yağış ve yıllık ortalama hava sıcaklığındaki değişimler olarak ele alınacaktır. Önceki paragrafta belirtilen nedenlerle model kararlı durum yaklaşımı ile kurgulanacağı için, iklim değişiminin mevsimsel yağış ve hava sıcaklığı değişimi etkileri dikkate alınmayacaktır.

Yıllık ortalama yağıştaki değişim su ekosisteminde aşağıdaki değişimlere neden olacaktır

- Havzadaki yağış/akış düzeninin değişmesi nedeniyle ekosistemine giren havza kökenli yüzeysel akış değişecektir. Bu durumda su ekosisteminin çıkış akımı da değişeceğinden hidrolik bekletme süresi değişecektir. Hidrolik bekletme süresinin değişmesi su ekosistemi içindeki tüm madde ve ısı taşınımını değiştirecektir. Bunun önemli bir etkisi, hava sıcaklığının hiç değişmemesi durumunda bile sistemin içindeki taşınımın değişmesinden dolayı su sıcaklığının değişecek olmasıdır. Ayrıca çıkış akımı ve buharlaşma dengesi de hava sıcaklığındaki değişim haricinde değişecektir.
- Yüzeysel akışın değişmesi ayrıca havza içindeki taşınım proseslerini (örneğin erozyonu) değiştireceği için sisteme dışarıdan giren yükler de değişecektir.

Yıllık ortama hava sıcaklığı değişiminin etkileri ise doğrudan su sıcaklığı üzerinde olacak ve buharlaşmayı da etkilediği için, yağış miktarının hiç değişmediği durumda dahi taşınım, su sıcaklığı ve hidrolik bekletme süresine yukarıda öngörülenlere benzer etkileri olacaktır. Burada vurgulanması gereken, sulak alanların sığ su ekosistemleri olması nedeniyle özellikle buharlaşma sebebiyle su miktarı hatta yıllık su hacminin ve su sıcaklılarının bağıl değişimine diğer nispeten daha derin olan durgun sistemlerinden (örneğin alışılagelmiş göller veya baraj gölleri) daha şiddetli tepki vermelerinin beklenmesidir[5]. Beklenen değişikliler incelendiğinde; serbest ve bağlı besin elementleri için önerilen kararlı durum analizi modeli (Denklem 2.11 ve Denklem 2.12) aşağıda verildiği gibi yazılmalıdır (Denklem 3.1 ve Denklem 3.2).

$$AN(P,T_A) = mia_{AN,AN}(P,T_A)\cdot W_{AN}(P,T_A) + mia_{AN,BN}(P,T_A)\cdot W_{BN}(P,T_A) \quad \text{(Denklem 3.1)}$$

$$BN(P,T_A) = mia_{BN,AN}(P,T_A)\cdot W_{AN}(P,T_A) + mia_{BN,BN}(P,T_A)\cdot W_{BN}(P,T_A) \quad \text{(Denklem 3.2)}$$

[4] *Bu modelin gerçek bir sulak alan ekosisteminin çok basitleştirilmiş bir temsili olduğu ve herhangi bir probleme doğrudan uygulanmasının çok dikkatli bir çalışma ile yapılması gerektiği açıktır. Özellikle yaşam bilimlerinde uzman olan birçok okuyucu tarafından da eleştiriye hedef olması olasıdır. Ancak bu modelin kurulumundaki amaç, doğrudan bir probleme uygulanması değil, bu bölümde önerilen genel bir model yapısının değerlendirilmesidir.*

[5] *Bu beklentiler ve benzerleri elbette sağduyulu birçok bilim insanı tarafından da dile getirilmekle birlikte beklenen değişimleri sayısal olarak ortaya koyabilmek pek kolay değildir ve ülkemizde bu tür çalışmalar nispeten nadirdir. Bu nedenle de bu kısımda anlatılan bir hesap aracı yaklaşımı ortaya koyulacaktır.*

Bu denklemlerde, yağış hava sıcaklığı anlamındadır. Eğer iklim değişimi sonucu yağış hava sıcaklığı ise kadar değişiyorsa serbest ve bağlı besin elementi değişimlerinin hesaplanması için, tam diferansiyellerinin alınması yeterli olacaktır (Denklem 3.3 ve Denklem 3.4). Bu denklemlerdeki "" diferansiyel operatörüdür ve herhangi bir bağımlı ya da bağımsız değişken yönündeki çok küçük bir değişimi ifade etmektedir.

$$
\begin{aligned}
dAN(P,T_A) &= \frac{\partial AN(P,T_A)}{\partial P}\cdot dP + \frac{\partial AN(P,T_A)}{\partial T_A}\cdot dT_A = \\
&\left(\frac{\partial}{\partial P}AN(P,T_A)\right)\cdot dP + \left(\frac{\partial}{\partial T_A}AN(P,T_A)\right)\cdot dT_A = \\
&\left(\frac{\partial}{\partial P}\left(mia_{AN,AN}(P,T_A)\cdot W_{AN}(P,T_A) + mia_{AN,BN}(P,T_A)\cdot W_{BN}(P,T_A)\right)\right)\cdot dP + \\
&\left(\frac{\partial}{\partial T_A}\left(mia_{AN,AN}(P,T_A)\cdot W_{AN}(P,T_A) + mia_{AN,BN}(P,T_A)\cdot W_{BN}(P,T_A)\right)\right)\cdot dT_A = \\
&\left(\frac{\partial mia_{AN,AN}(P,T_A)}{\partial P}\cdot W_{AN}(P,T_A) + mia_{AN,AN}(P,T_A)\cdot\frac{\partial W_{AN}(P,T_A)}{\partial P} + \right. \\
&\left.\frac{\partial mia_{AN,BN}(P,T_A)}{\partial P}\cdot W_{BN}(P,T_A) + mia_{AN,BN}(P,T_A)\cdot\frac{\partial W_{BN}(P,T_A)}{\partial P}\right)\cdot dP + \\
&\left(\frac{\partial mia_{AN,AN}(P,T_A)}{\partial T_A}\cdot W_{AN}(P,T_A) + mia_{AN,AN}(P,T_A)\cdot\frac{\partial W_{AN}(P,T_A)}{\partial T_A} + \right. \\
&\left.\frac{\partial mia_{AN,BN}(P,T_A)}{\partial T_A}\cdot W_{BN}(P,T_A) + mia_{AN,BN}(P,T_A)\cdot\frac{\partial W_{BN}(P,T_A)}{\partial T_A}\right)\cdot dT_A
\end{aligned}
\qquad \text{(Denklem 3.3)}
$$

$$
\begin{aligned}
dBN(P,T_A) &= \frac{\partial BN(P,T_A)}{\partial P}\cdot dP + \frac{\partial BN(P,T_A)}{\partial T_A}\cdot dT_A = \\
&\left(\frac{\partial}{\partial P}BN(P,T_A)\right)\cdot dP + \left(\frac{\partial}{\partial T_A}BN(P,T_A)\right)\cdot dT_A = \\
&\left(\frac{\partial}{\partial P}\left(mia_{BN,AN}(P,T_A)\cdot W_{AN}(P,T_A) + mia_{BN,BN}(P,T_A)\cdot W_{BN}(P,T_A)\right)\right)\cdot dP + \\
&\left(\frac{\partial}{\partial T_A}\left(mia_{BN,AN}(P,T_A)\cdot W_{AN}(P,T_A) + mia_{BN,BN}(P,T_A)\cdot W_{BN}(P,T_A)\right)\right)\cdot dT_A = \\
&\left(\frac{\partial mia_{BN,AN}(P,T_A)}{\partial P}\cdot W_{AN}(P,T_A) + mia_{BN,AN}(P,T_A)\cdot\frac{\partial W_{AN}(P,T_A)}{\partial P} + \right. \\
&\left.\frac{\partial mia_{BN,BN}(P,T_A)}{\partial P}\cdot W_{BN}(P,T_A) + mia_{BN,BN}(P,T_A)\cdot\frac{\partial W_{BN}(P,T_A)}{\partial P}\right)\cdot dP + \\
&\left(\frac{\partial mia_{BN,AN}(P,T_A)}{\partial T_A}\cdot W_{AN}(P,T_A) + mia_{BN,AN}(P,T_A)\cdot\frac{\partial W_{AN}(P,T_A)}{\partial T_A} + \right. \\
&\left.\frac{\partial mia_{BN,BN}(P,T_A)}{\partial T_A}\cdot W_{BN}(P,T_A) + mia_{BN,BN}(P,T_A)\cdot\frac{\partial W_{BN}(P,T_A)}{\partial T_A}\right)\cdot dT_A
\end{aligned}
\qquad \text{(Denklem 3.4)}
$$

$dAN(P,T_A)$ ve $dBN(P,T_A)$ sırasıyla serbest ve bağlı besin elementlerinin değişimini temsil etmektedir ve Denklem 3.3 ve Denklem 3.4 kullanılarak hesaplanabilmeleri için $mia_{AN,AN}(P,T_A)$, $mia_{AN,BN}(P,T_A)$, $mia_{BN,AN}(P,T_A)$, $mia_{BN,BN}(P,T_A)$, $W_{AN}(P,T_A)$ ve $W_{BN}(P,T_A)$ ve ifadelerinin sürekli ve türevlenebilir olarak ortaya koyulması gerekmektedir[6]. Bu fonksiyonlar iklim değişiminin yönlerini ortaya koymakta, kısmî türevler iki ayrı iklim etkeninin serbest ve bağlı besin elementlerinin toplam değişimdeki etkilerini belirleyebilmekte ve herhangi bir $P$, $T_A$ veri noktasındaki serbest ve bağlı besin elementlerinin konsantrasyonlarını doğrudan hesaplanabilmelerini sağlamaktadır.

Bu amaçla öncelikle Denklem 2.7'deki tepki matrisine yakından bakılabilir (Şekil 3.1).

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} AN \\ BN \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} a_{AN,AN} & a_{AN,BN} \\ a_{BN,AN} & a_{BN,BN} \end{bmatrix}}_{\text{Ekosistemin dış etkilere gösterdiği tepkisel davranışı temsil eden tepki matrisi}} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} AN \\ BN \end{bmatrix}}_{\text{Ekosistemin durumunu temsil eden çözüm vektörü}} + \underbrace{\begin{bmatrix} W_{AN} \\ W_{BN} \end{bmatrix}}_{\text{Ekosisteme olan dış etkileri temsil eden sabitler vektörü}}$$

$$\begin{bmatrix} -\left(\frac{Q_{OUT,NAE}}{V} + k_U\right) & k_R \\ k_U & -\left(\frac{Q_{OUT,NAE}}{V} + \frac{v_{B,BN}}{V} + k_R\right) \end{bmatrix}$$

***Şekil 3.1*** *Tepki matrisine yakından bakış*

Modelin basit tutulabilmesi için, su ekosistemi hacminin ve çökelme hızının yağış ve hava sıcaklığından bağımsız olduğu varsayılırsa tepki matrisindeki debi ve kinetik terimler yağış ve/veya hava sıcaklığına bağlıdır (Şekil 3.2'de kırmızı ile gösterilen ifadeler)

$$\begin{bmatrix} -\left(\frac{Q_{OUT,NAE}}{V} + k_U\right) & k_R \\ k_U & -\left(\frac{Q_{OUT,NAE}}{V} + \frac{v_{B,BN}}{H} + k_R\right) \end{bmatrix}$$

***Şekil 3.2*** *Tepki matrisinin yağış ve hava sıcaklığına bağlı terimleri*

Şekil 2.6'daki kinetik terimler su sıcaklığına doğrudan bağlıdır. Su sıcaklığı ise hem yağışa hem de hava sıcaklığına bağlıdır. Bu durum Denklem 3.5 ve Denklem 3.6 ile ifade edilmektedir. Bu

denklemlerde hava sıcaklığı, P ise yağış anlamındadır.

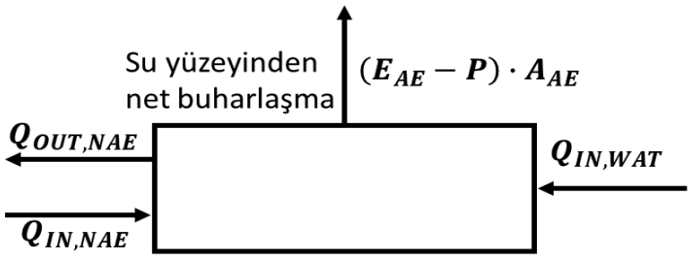
(Denklem 3.5)

$$\boldsymbol{k_R} = f_1(T_W), \qquad T_W = T_W(T_A, P) \Rightarrow \boldsymbol{k_R} = f_1(T_A, P)$$ (Denklem 3.6)

Yıllık $\boldsymbol{k_U} = f_2(T_W), \qquad T_W = T_W(T_A, P) \Rightarrow \boldsymbol{k_U} = f_2(T_A, P)$ ortalama çıkış debisi için, su ekosistemi üzerinde bir su bütçesi yazılabilir (Şekil 3.3). Bu su bütçesinde sistemin yeraltı suyu ile etkileşiminin ısı etkileşimi açısından nötr olduğu varsayılmıştır[7].

***Şekil 3.3*** *Su ekosistemi üzerinden yazılan su bütçesi*

$$\boldsymbol{Q_{OUT,NAE} + (E_{AE} - P) \cdot A_{AE} = Q_{IN,WAT} + Q_{IN,NAE}}$$
$$\boldsymbol{Q_{OUT,NAE} = Q_{IN,WAT} + Q_{IN,NAE} - (E_{AE} - P) \cdot A_{AE}}$$




Şekil 3.3'te verilen su bütçesi yağışa doğrudan bağlıdır çünkü bütçede yağış terimi doğrudan bulunmaktadır. Buharlaşma terimi $E_{AE}$ da su sıcaklığına bağlıdır. $A_{AE}$ ise yüzey alanı anlamındadır. Su sıcaklığı ise hem su bütçesinin kendisine hem hava sıcaklığına bağlıdır. Bu durumda su yüzünden buharlaşma için Denklem 3.7 geçerlidir.

(Denklem 3.7)

$$E_{AE} = f_3(T_W), \qquad T_W = T_W(T_A, P) \Rightarrow E_{AE} = f_3(T_A, P)$$

Son olarak da terimi havzadan gelen akışı temsil ettiği için temel hidroloji bilgisi ve kuralları dikkate alınarak Şekil 2.4 Dinamik yaklaşım Denklem 3.8 yazılabilir.

$$Q_{IN,WAT} = f_4(T_A, P)$$ (Denklem 3.8)

Denklem 3.7 ve Denklem 3.8, Şekil 3.3'te verilen su bütçesinde yerlerine koyulduklarında, Denklem 3.9 elde edilir.

$$Q_{OUT,NAE} = f_4(T_A, P) + Q_{IN,NAE} - (f_3(T_A, P) - P) \cdot A_{AE}$$ (Denklem 3.9)

[7] *Bu varsayım basitleştirme içindir ve gerçek bir çalışmada yapılıp yapılamayacağına birçok veri analiz edilerek karar verilebilmektedir.*

Buna göre tepki matrisi yıllık yağışa ve yıllık ortalama hava sıcaklığına bağlı yazılabilir (Şekil 3.4).

$$\begin{bmatrix} -\left(\frac{f_4(T_A,P)+\boldsymbol{Q_{IN,NAE}}-(f_3(T_A,P)-\boldsymbol{P})\cdot\boldsymbol{A_{AE}}}{\boldsymbol{V}}+f_2(T_A,P)\right) & f_1(T_A,P) \\ f_2(T_A,P) & -\left(\frac{f_4(T_A,P)+\boldsymbol{Q_{IN,NAE}}-(f_3(T_A,P)-\boldsymbol{P})\cdot\boldsymbol{A_{AE}}}{\boldsymbol{V}}+\frac{\boldsymbol{v_{B,BN}}}{\boldsymbol{H}}+f_1(T_A,P)\right) \end{bmatrix}$$

***Şekil 3.4*** *Tepki matrisinin yıllık yağış ve yıllık ortalama sıcaklığa göre yazılması*

Öncelikle havzadan gelen toplam akışı veren bir ifade gerekmektedir. Bu amaçla yıllık potansiyel evapotranspirasyon Coutagne[8] formülü kullanılarak hesaplanabilir ve düzeltilip yıllık gerçekleşen evapotranspirasyona çevrilip yıllık yağıştan çıkarılıp havza alanı ile çarpılarak yazılan bir ifade türetilebilir (Denklem 3.10)

$$f_4(T_A,P)=\boldsymbol{Q_{IN,WAT}}=\frac{1000}{365}\cdot\left(P-CC_1\cdot\left(P-\frac{0.001}{0.8+0.14\cdot T}\cdot P^2\right)\right)\cdot A_{WA} \qquad \text{(Denklem 3.10)}$$

Denklem 3.10'da P yıllık yağış (mm/yıl), T yıllık ortalama sıcaklık (°C), $A_{WA}$ Havza alanı ($km^2$) ve CC1 potansiyel evaportanspirasyonu gerçek evapotranspirasyona dönüştüren ve birden küçük olan bir katsayıdır. Havzadan çıkıp su ekosistemine giren debi ise $m^3$/gün biriminde hesaplanmaktadır. Bir sonraki adım ise, hem su yüzünden buharlaşmanın (ve dolayısıyla da su dengesinin) hem de kinetik sabitlerin bağlı olduğu su sıcaklığının hesaplanmasıdır. Bu amaçla Arceivala (2002) tarafından verilen Denklem 3.11[9] kullanılabilir.

$$T_W=\frac{A_{AE}\cdot f\cdot T_A+\boldsymbol{Q_{IN,WAT}}\cdot T_{IN}}{A_{AE}\cdot f+\boldsymbol{Q_{IN,WAT}}} \qquad \text{(Denklem 3.11)}$$

Bu denklemde

: Sisteme giren suyun sıcaklığı (havzadan gelen akışın sıcaklığı) (°C)

: Ampirik bir oran sabiti (0,49 – 0,50 alınır)

anlamındadır. Sisteme giren suyun sıcaklığı ise Stefan ve Preud'homme (1993) tarafından verilen Denklem 3.12 ile tahmin edilebilir.

$$T_{IN}=5+0{,}75\cdot T_A \qquad \text{(Denklem 3.12)}$$

Denklem 3.12 ve Denklem 3.10, Denklem 3.11'de yerlerine koyulduğunda, Denklem 3.13 elde edilmektedir.

[8] *Buna bezer birçok formül bulunmaktadır.*

[9] *Bu denklem aslında stabilizasyon havuzları için verilmiş olmakla birlikte, sığ ve nispeten küçük olan sulak alanlar için de basit bir model düzeyinde kullanımı uygundur.*

$$T_W = \frac{A_{AE} \cdot f \cdot T_A + f_4(T_A, P) \cdot (5 + 0{,}75 \cdot T_A)}{A_{AE} \cdot f + f_4(T_A, P)} =$$

$$\frac{A_{AE} \cdot f \cdot T_A + \frac{1000}{365} \cdot \left(P - CC_1 \cdot \left(P - \frac{0.001}{0.8 + 0.14 \cdot T} \cdot P^2\right)\right) \cdot A_{WA} \cdot (5 + 0{,}75 \cdot T_A)}{A_{AE} \cdot f + \frac{1000}{365} \cdot \left(P - CC_1 \cdot \left(P - \frac{0.001}{0.8 + 0.14 \cdot T} \cdot P^2\right)\right) \cdot A_{WA}} \quad \text{(Denklem 3.13)}$$

Kinetik katsayılar ise Arrhenius ifadesi[10] ile hesaplanabilir (Denklem 3.14 ve Denklem 3.15)

$$f_1(T_A, P) = k_{R,20} \cdot \theta_{k_R}{}^{T_W - 20} \quad \text{(Denklem 3.14)}$$

$$f_2(T_A, P) = k_{U,20} \cdot \theta_{k_U}{}^{T_W - 20} \quad \text{(Denklem 3.15)}$$

Bu denklemlerde, $\theta_{kR}$ ve $\theta_{kU}$ *sıcaklık düzeltme terimleridir. Denklem 3.13, Denklem 3.14 ve Denklem 3.15'te yerine koyulunca Denklem 3.16 ve Denklem 3.17 elde edilir.*

$$f_1(T_A, P) = k_{R,20} \cdot \theta_{k_R}{}^{\frac{A_{AE} \cdot f \cdot T_A + f_4(T_A,P) \cdot (5 + 0{,}75 \cdot T_A)}{A_{AE} \cdot f + f_4(T_A,P)} - 20} \quad \text{(Denklem 3.14)}$$

$$f_2(T_A, P) = k_{U,20} \cdot \theta_{k_U}{}^{\frac{A_{AE} \cdot f \cdot T_A + f_4(T_A,P) \cdot (5 + 0{,}75 \cdot T_A)}{A_{AE} \cdot f + f_4(T_A,P)} - 20} \quad \text{(Denklem 3.15)}$$

Kinetik sabitlerden sonra, su ekosisteminden çıkış akımının hesaplanabilmesi için Şekil 3.3'te verilen su bütçesinin kurulması gerekmektedir. Bu amaçla öncelikle su yüzünden buharlaşma hesaplanmalıdır. Bu amaçla da Raudkivi (1979) tarafından herhangi bir sıcaklık için suyun buhar basıncını veren denklem kullanılarak Denklem 3.16 elde edilebilir.

$$f_3(T_A, P) = K_M \cdot \underbrace{4{,}59 \cdot \left(exp\left(\frac{17{,}27 \cdot T_W(T_A, P)}{237{,}3 + T_W(T_A, P)}\right) - R_L \cdot exp\left(\frac{17{,}27 \cdot T_A}{237{,}3 + T_A}\right)\right)}_{\substack{\text{Doygun su yüzeyi ile doygun olmayan atmosfer} \\ \text{arasındaki su buhar basıncı farkı } (mm\ Hg)}} \quad \text{(Denklem 3.16)}$$

Denklem 3.16'daki terimi bağıl nem, ise hem birim dönüşümü hem de su yüzeyi ile atmosfer arasındaki taşınımı sağlayan bir katsayı[11] anlamındadır. Denklem 3.13, Denklem 3.16'da yerine koyulduğunda Denklem 3.17 elde edilmektedir.

[10] *Burada modeli mümkün olduğu kadar basit bir şekilde kurgulamak amacıyla biyolojik reaksiyonların sıcaklıkla sürekli arttığını varsayan Arrhenius ifadesi kullanılmıştır. Bu reaksiyonları sıcaklık arttıkça arttıran ancak belli bir optimum sıcaklık aşıldığında tekrar azaltan daha gerçekçi ancak karmaşık ve çok daha fazla sayıda parametre gerektiren alt modellerin de kullanımı mümkündür.*

[11] *Bu ifade; Bowen oranı, rüzgâr hızı, suyun ısı kapasitesi gibi başka etkenlere de bağlı olmakla birlikte matematiksel anlamda bir sabittir.*

$$f_3(T_A,P) = K_M \cdot \left( exp\left( \frac{17{,}27 \cdot \frac{A_{AE} \cdot f \cdot T_A + f_4(T_A,P) \cdot (5 + 0{,}75 \cdot T_A)}{A_{AE} \cdot f + f_4(T_A,P)}}{237{,}3 + \frac{A_{AE} \cdot f \cdot T_A + f_4(T_A,P) \cdot (5 + 0{,}75 \cdot T_A)}{A_{AE} \cdot f + f_4(T_A,P)}} \right) - R_L \cdot exp\left( \frac{17{,}27 \cdot T_A}{237{,}3 + T_A} \right) \right)$$

(Denklem 3.17)

Denklem 3.10 ve Denklem 3.17, Denklem 3.9'da yerine koyulunca sulak alandan çıkış debisi elde edilir (Denklem 3.18).

$$Q_{OUT,NAE} = \frac{1000}{365} \cdot \left( P - CC_1 \cdot \left( P - \frac{0.001}{0.8 + 0.14 \cdot T} \cdot P^2 \right) \right) \cdot A_{WA} + Q_{IN,NAE} -$$
$$\left( K_M \cdot \left( exp\left( \frac{17{,}27 \cdot \frac{A_{AE} \cdot f \cdot T_A + f_4(T_A,P) \cdot (5 + 0{,}75 \cdot T_A)}{A_{AE} \cdot f + f_4(T_A,P)}}{237{,}3 + \frac{A_{AE} \cdot f \cdot T_A + f_4(T_A,P) \cdot (5 + 0{,}75 \cdot T_A)}{A_{AE} \cdot f + f_4(T_A,P)}} \right) - R_L \cdot exp\left( \frac{17{,}27 \cdot T_A}{237{,}3 + T_A} \right) \right) - P \right) \cdot A_{AE}$$

(Denklem 3.18)

Bu aşamada artık tepki matrisinin elemanlarını yağış ve hava sıcaklığının fonksiyonları olarak yazmak için gerekli tüm ifadeler elde edilmiştir. Denklem 3 ve Denklem 4 kullanılarak, tepki matrisinin elemanlarını veren Denklem 3.19 - Denklem 3.22 elde edilebilir.

$$a_{AN,AN} = -\left( \frac{Q_{OUT,NAE}}{V} + k_U \right) = -Q_{OUT,NAE} - k_U =$$
$$-\frac{1000}{365} \cdot \left( P - CC_1 \cdot \left( P - \frac{0.001}{0.8 + 0.14 \cdot T} \cdot P^2 \right) \right) \cdot \frac{A_{WA}}{V} + \frac{Q_{IN,NAE}}{V} +$$
$$\left( K_M \cdot \left( exp\left( \frac{17{,}27 \cdot \frac{A_{AE} \cdot f \cdot T_A + f_4(T_A,P) \cdot (5 + 0{,}75 \cdot T_A)}{A_{AE} \cdot f + f_4(T_A,P)}}{237{,}3 + \frac{A_{AE} \cdot f \cdot T_A + f_4(T_A,P) \cdot (5 + 0{,}75 \cdot T_A)}{A_{AE} \cdot f + f_4(T_A,P)}} \right) - R_L \cdot exp\left( \frac{17{,}27 \cdot T_A}{237{,}3 + T_A} \right) \right) - P \right) \cdot \frac{A_{AE}}{V} -$$
$$k_{U,20} \cdot \theta_{k_U}^{\frac{A_{AE} \cdot f \cdot T_A + f_4(T_A,P) \cdot (5 + 0{,}75 \cdot T_A)}{A_{AE} \cdot f + f_4(T_A,P)} - 20}$$

(Denklem 3.19)

$$a_{AN,BN} = k_R = k_{R,20} \cdot \theta_{k_R}^{\frac{A_{AE} \cdot f \cdot T_A + f_4(T_A,P) \cdot (5 + 0{,}75 \cdot T_A)}{A_{AE} \cdot f + f_4(T_A,P)} - 20}$$ (Denklem 3.20)

$$a_{BN,AN} = k_U = k_{U,20} \cdot \theta_{k_U}^{\frac{A_{AE} \cdot f \cdot T_A + f_4(T_A,P) \cdot (5 + 0{,}75 \cdot T_A)}{A_{AE} \cdot f + f_4(T_A,P)} - 20}$$ (Denklem 3.21)

$$a_{BN,BN} = -\left(\frac{Q_{OUT,NAE}}{V} + \frac{v_{B,BN}}{H} + k_R\right) = -\frac{Q_{OUT,NAE}}{V} - \frac{v_{B,BN}}{H} - k_R =$$

$$-\frac{1000}{365}\cdot\left(P - CC_1\cdot\left(P - \frac{0.001}{0.8+0.14\cdot T}\cdot P^2\right)\right)\cdot\frac{A_{WA}}{V} + \frac{Q_{IN,NAE}}{V} +$$

$$\left(K_M\cdot\left(exp\left(\frac{17{,}27\cdot\frac{A_{AE}\cdot f\cdot T_A + f_4(T_A,P)\cdot(5+0{,}75\cdot T_A)}{A_{AE}\cdot f + f_4(T_A,P)}}{237{,}3+\frac{A_{AE}\cdot f\cdot T_A + f_4(T_A,P)\cdot(5+0{,}75\cdot T_A)}{A_{AE}\cdot f + f_4(T_A,P)}}\right) - R_L\cdot exp\left(\frac{17{,}27\cdot T_A}{237{,}3+T_A}\right)\right) - P\right)\cdot\frac{A_{AE}}{V} -$$

$$\frac{v_{B,BN}}{H} - k_{R,20}\cdot\theta_{k_R}^{\frac{A_{AE}\cdot f\cdot T_A + f_4(T_A,P)\cdot(5+0{,}75\cdot T_A)}{A_{AE}\cdot f + f_4(T_A,P)}-20}$$

(Denklem 3.22)

Bu aşamada tepki matrisi, iklim değişiminin ana değişkenleri olan yıllık yağış ve yıllık ortalama sıcaklığın fonksiyonları olarak elde edilmiştir. Benzer işlemlerin ekosisteme dış etkileri (dışarıdan giren serbest ve bağlı besin elementi yüklerini) temsi eden sabitler vektörüne de uygulanması gerekmektedir. Su ekosistemine dışarıdan giren yükler havzadan akış ile taşınmaktadır. Bu durumda, havzadan gelen serbest ve bağlı besin elementi yükleri için Denklem 3.23 ve Denklem 3.24 yazılabilir.

$$W_{AN} = Q_{IN,WAT}\cdot CC_{AN}(P,T_A)\cdot AN_{WAT,REF} =$$

$$\frac{1000}{365}\cdot\left(P - CC_{ET}\cdot\left(P - \frac{0.001}{0.8+0.14\cdot T_A}\cdot P^2\right)\right)\cdot A_{WA}\cdot CC_{AN}(P,T_A)\cdot AN_{WAT,REF} \quad \text{(Denklem 3.23)}$$

$$W_{BN} = Q_{IN,WAT}\cdot CC_{BN}(P,T_A)\cdot BN_{WAT,REF} =$$

$$\frac{1000}{365}\cdot\left(P - CC_{ET}\cdot\left(P - \frac{0.001}{0.8+0.14\cdot T_A}\cdot P^2\right)\right)\cdot A_{WA}\cdot CC_{AN}(P,T_A)\cdot BN_{WAT,REF} \quad \text{(Denklem 3.24)}$$

Bu denklemlerde

$AN_{WAT,REF}$ : Referans koşullarda havzadan gelen akışın serbest besin elementi konsantrasyonu (g/m$^3$)

$BN_{WAT,REF}$ : Referans koşullarda havzadan gelen akışın bağlı besin elementi konsantrasyonu (g/m$^3$)

$CC_{AN}(P, T_A)$ : Serbest besin elementi konsantrasyonu düzeltme faktörünü veren fonksiyon

$CC_{BN}(P, T_A)$ : Bağlı besin elementi konsantrasyonu düzeltme faktörünü veren fonksiyon

anlamındadır. $CC_{AN}(P, T_A)$ ve $CC_{BN}(P, T_A)$ fonksiyonları türetilebilir olmakla birlikte ifadelerinin burada gösterilmesi pratik olmayacaktır.

Bununla birlikte okuyucuya ipucu vermek amacıyla aşağıda sıralanan tespitler yapılmıştır:

- Bu fonksiyonlar, öncelikle havzadaki erozyona bağlıdır. Erozyon ise yüzeysel akışa bağlıdır. Bu durumda

  $Q_{IN,WAT}$ debisinin en azından dolaylı ve dolaysız akışa dönüştürülmesi düşünülebilir.

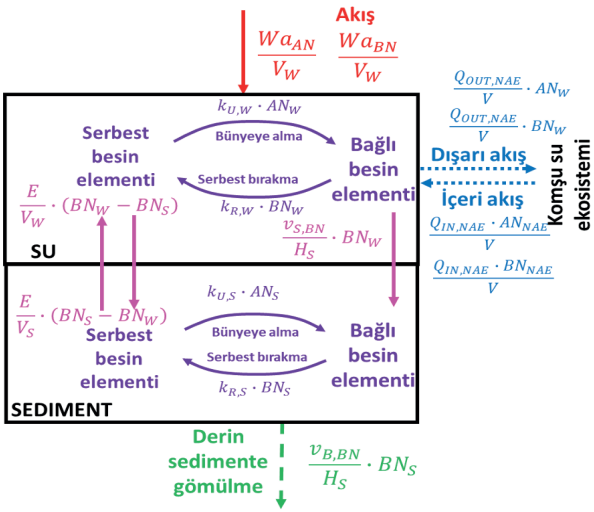
- Serbest ve bağlı besin elementleri su ekosistemlerinde olduğu gibi, havzanın karasal ekosisteminde de bünyeye alınmakta ve serbest bırakılmaktadır. Bu etkilerin de ilgili fonksiyonlara bu bölümde su ekosistem için yapılan işlemlere benzer tarzda türetilerek gömülmesi gereklidir.

Bu aşamada, Denklem 3.19 - Denklem 3.24, Denklem 10'da yerine koyularak sistem matrisinin tersinin elemanları elde edilebilir ve elde edilen elemanlar Denklem 2.11 ve Denklem 2.12'de yerlerine koyularak herhangi bir ortalama yıllık sıcaklık ve yıllık yağış için serbest ve bağlı besin elementi konsantrasyonları hesaplanabilir. Eğer sıcaklık-yağış model uzayının herhangi bir noktası civarında toplam iklim değişiminin serbest ve bağlı besin elementi konsantrasyonlarına etkisinin yönünün ve hava sıcaklığı ve yıllık yağış için ayrı ayrı yönlerinin verilmesi gerekmesi durumunda aynı denklemler Denklem 3.3 ve Denklem 3.4'te yerlerine koyulabilir. Bu son işlemin oldukça uzun ve zahmetli olduğunun göz önünde bulundurulmalıdır.

## 4. Gösterilen Tekniklerin Daha Gerçekçi Su Ekosistemi Modellerinde Uygulanması

Bundan önceki iki kısımda, mümkün olan en basit su ekosistemi modelleri üzerinden iklim değişikliği etkisinin nasıl belirletilebileceği gösterilmeye çalışılmıştır. Su ekosistemleri, ilgili kısımlarda temsil edilen sistemlerden daha karmaşıktırlar. Örneğin sığ bir sulak alan ekosistemi en azından kendi tabanındaki sediment ile etkileşimde olacak ve sedimenti içindeki kinetikler su sütunundaki kinetiklerden farklı reaksiyon hızlarında ilerleyecektir. Buna uygun ve yine mümkün olduğu kadar basit kurgulanmış bir model türetilmiş sistem denklemleri ile birlikte Şekil 4.1'de verilmektedir.

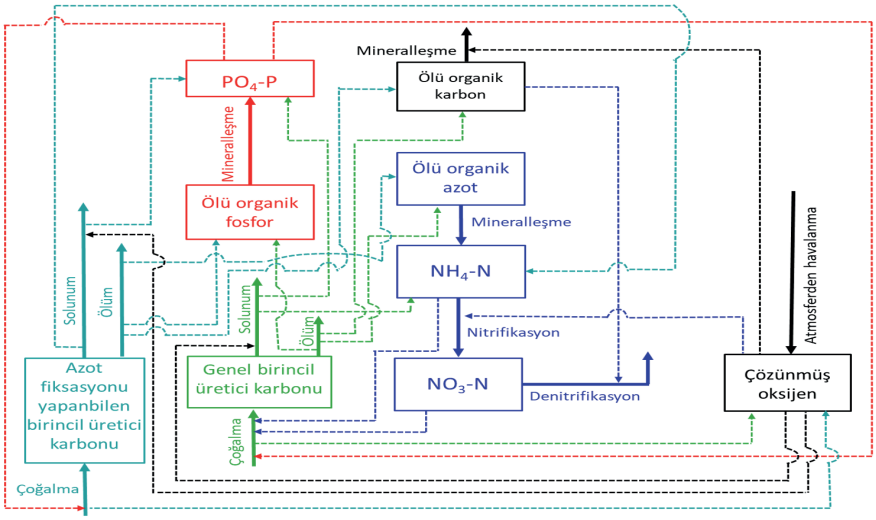
Bu modelin, kararlı durum analizi için analitik olarak çözümü yapılabilmekle birlikte çok uzun olacağı için burada gösterilmeyecektir. Dinamik çözüm ise ise analitik çözümün mümkün olduğu son seviyedir. Dinamik analitik çözümler özdeğer ve özvektörlerin hesaplanmasına bağlıdır ve özdeğerlerin hesaplanması sırasında bir karakteristik polinom elde edilmekte ve karakteristik polinomum köklerinin bulunması gerekmektedir. Uzun ve karmaşık olmakla birlikte, dördüncü dereceden herhangi bir polinomum sembolik hesaplar ile köklerinin elde edilmesi mümkündür. Ancak Ablel-Ruffini (Ruffini, 1799 ve Abel, 1824) teoremine göre daha yüksek mertebeden polinomların köklerini doğrudan veren ifadelerin elde edilmesi mümkün değildir. King (1996) bu imkansızlığın aşılması için bir yöntem önermekle birlikte ilgili yaklaşım halihazırda pratik değildir.




$$\begin{bmatrix} \frac{dAN_W}{dt} \\ \frac{dAN_S}{dt} \\ \frac{dBN_W}{dt} \\ \frac{dBN_S}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(k_{U,W} + \frac{D_{W,S} \cdot A}{V_W \cdot 0{,}5 \cdot (H_W + H_S)}\right) & \frac{D_{W,S} \cdot A}{V_W \cdot 0{,}5 \cdot (H_W + H_S)} & k_{R,W} & 0 \\ \frac{D_{W,S} \cdot A}{V_W \cdot 0{,}5 \cdot (H_W + H_S)} & -\left(k_{U,S} + \frac{D_{W,S} \cdot A}{V_W \cdot 0{,}5 \cdot (H_W + H_S)}\right) & -\left(k_{R,W} + \frac{v_S}{H_W}\right) \cdot BN_W & 0 \\ k_{U,W} \cdot AN_W & 0 & -\left(k_{R,W} + \frac{v_S}{H_W}\right) & 0 \\ 0 & k_{U,S} & \frac{v_S}{H_S} & -\left(k_{R,S} + \frac{v_B}{H_S}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} AN_W \\ AN_S \\ BN_W \\ BN_S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{W_{AN}}{V_W} \\ 0 \\ \frac{W_{BN}}{V_W} \\ 0 \end{bmatrix}$$

***Şekil 4.1*** *Taban etkileşimli sulak alan modeli*

Ancak gerçek modeller aslında daha da karmaşıktır. Örnek bir su ekosistemi modelinin yalnızca kompartımanları Şekil 4.2'de ilgili terimler ise Şekil 4.3'te verilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi model doğrusal değildir ve birden çok besin elementi ve faktörün sınırlayıcı bir etkisi vardır. Bu durumda tam bir analitik çözüm zaten mümkün görünmemektedir.



| Proses | Proses Hızının Matematiksel ifadesi | Birim |
|---|---|---|
| Ölü organik azotun mineralleşmesi | $k_{MINER,ORGN,20} \cdot \theta_{MINER,ORGN}^{(TEMP-20)} \cdot \frac{DOXY}{DOXY + k_{HS,MINER,DOXY}} \cdot DETN +$ $S_{O_2:C,Denitr} \cdot k_{DENITR,20} \cdot \theta_{DENITR}^{(TEMP-20)} \cdot \frac{K_{HS,DENITR,DOXY}}{DOXY + K_{HS,DENITR,DOXY}} \cdot NO3N \cdot \frac{DETN}{DETC}$ | $gN \cdot m^{-3} \cdot gün^{-1}$ |
| Nitrifikasyon | $k_{NITR,20} \cdot \theta_{NITR}^{(TEMP-20)} \cdot \frac{DOXY}{DOXY + k_{HS,NITR,DOXY}} \cdot NH4N$ | $gN \cdot m^{-3} \cdot gün^{-1}$ |
| Denitrifikasyon | $k_{DENITR,20} \cdot \theta_{DENITR}^{(TEMP-20)} \cdot \frac{K_{HS,DENITR,DOXY}}{DOXY + K_{HS,DENITR,DOXY}} \cdot NO3N$ | $gN \cdot m^{-3} \cdot gün^{-1}$ |
| Ölü organik fosforun mineralleşmesi | $k_{MINER,DETP,20} \cdot \theta_{MINER,ORGP}^{(TEMP-20)} \cdot \frac{DOXY}{DOXY + k_{HS,MINER,DOXY}} \cdot DETP +$ $S_{O_2:C,Denitr} \cdot k_{DENITR,20} \cdot \theta_{DENITR}^{(TEMP-20)} \cdot \frac{K_{HS,DENITR,DOXY}}{DOXY + K_{HS,DENITR,DOXY}} \cdot NO3N \cdot \frac{DETP}{DETC}$ | $gP \cdot m^{-3} \cdot gün^{-1}$ |
| Atmosfer ile havalanma | $k_A \cdot (DOXY_{SAT} - DOXY)$ $DOXY_{SAT}$ : Çözünmüş oksijenin sudaki doygunluk konsantrasyonu ($g \cdot m^{-3}$) | $gO_2 \cdot m^{-3} \cdot gün$ |
| Ölü organik karbonun mineralleşmesi | $k_{MINER,DETC,20} \cdot \theta_{MINER,CBOD}^{(TEMP-20)} \cdot \frac{DOXY}{DOXY + k_{HS,MINER,DOXY}} \cdot DETC$ | $gC \cdot m^{-3} \cdot gün$ |
| Genel birincil üreticinin çoğalması | $k_{GROW,GPPC,20} \cdot \theta_{GPPC,GROW}^{(TEMP-20)} \cdot min(lim_{LIGHT,GPPC}, lim_{NUT,GPPC}) \cdot GPPC$ Işık sınırlama faktörü $lim_{LIGHT,GPPC} = \frac{2.718 \cdot f_{DAY}}{k_E \cdot H} \cdot \left( exp\left(-\frac{I_A}{I_{S,GPPC}} \cdot exp(-1 \cdot k_E \cdot H)\right) - exp\left(-\frac{I_A}{I_{S,GPPC}}\right)\right)$ Besin elementi sınırlama faktörü $lim_{NUT} = min\left(\frac{NH4N + NO3N}{k_{HS,N,GPPC} + NH4N + NO3N}, \frac{PO4P}{k_{HS,P,GPPC} + PO4P}\right)$ | $gC \cdot m^{-3} \cdot gün^{-1}$ |
| Genel birincil üreticinin solunumu | $k_{RESP,PHYC,20} \cdot \theta_{RESP,GPPC}^{(TEMP-20)} \cdot GPPC$ | $gC \cdot m^{-3} \cdot gün^{-1}$ |
| Genel birincil üreticinin ölümü | $k_{DEATH,GPPC,20} \cdot \theta_{DEATH,GPPC}^{(TEMP-20)} \cdot GPPC$ | $gC \cdot m^{-3} \cdot gün^{-1}$ |
| Fiksasyon yapan birincil üreticinin çoğalması | $k_{GROW,FIXC,20} \cdot \theta_{GROW,FIXC}^{(TEMP-20)} \cdot min(lim_{LIGHT,FIXC}, lim_{NUT,FIXC}) \cdot FIXC$ Işık sınırlama faktörü $lim_{LIGHT,FIXC} = \frac{2.718 \cdot f_{DAY}}{k_E \cdot H} \cdot \left( exp\left(-\frac{I_A}{I_{S,FIXC}} \cdot exp(-1 \cdot k_E \cdot H)\right) - exp\left(-\frac{I_A}{I_{S,FIXC}}\right)\right)$ Besin elementi $lim_{NUT,FIXC} = min\left(\frac{k_{HS,N,FIXC}}{k_{HS,N,FIXC} + NH4N + NO3N}, \frac{PO4P}{k_{HS,P,FIXC} + PO4P}\right)$ | $gC \cdot m^{-3} \cdot gün^{-1}$ |
| Fiksasyon yapan birincil üreticinin solunumu | $k_{RESP,FIXC,20} \cdot \theta_{RESP,FIXC}^{(TEMP-20)} \cdot FIXC$ | $gC \cdot m^{-3} \cdot gün^{-1}$ |
| Fiksasyon yapan birincil üreticinin ölümü | $k_{DEATH,FIXC,20} \cdot \theta_{DEATH,FIXC}^{(TEMP-20)} \cdot FIXC$ | $gC \cdot m^{-3} \cdot gün^{-1}$ |

***Şekil 4.2*** *Genel bir su ekosistemi modelinin kinetik kompartımanları*

Bu türdeki modeller söz konusu olunca analitik çözümler yapılabilmesi için öncelikle modelin doğrusallaştırılması gerekmektedir. Doğrusallaştırma modelin zamansal ayrıklaştırılması sırasında yapılabilir. Örneğin model Euler yöntemi gibi bir sayısal yöntemle çözülürken her zaman adımı için ayrı bir doğrusal denklem takımı türetilebilir. Daha sonra elde edilen homojen olmayan doğrusal diferansiyel denklem takımı, özdeğer yöntemleri ile çözülebilir. Eğer denklem takımı 4 x 4'ten daha büyük bir tepki matrisi içeriyorsa özdeğerlerin ve özvektörlerin sembolik olarak çözülmesi mümkün değildir, ancak sayısal yöntemlerle hesaplanması durumunda analitik çözümü mümkündür ve sistemin anlık durumu sistemin başlangıç konsantrasyonları ve dış etkenler üzerinden tanımlanabilmektedir.

| Terim | Birim | İlgili durum değişkeni | Tanım |
|---|---|---|---|
| $k_{MINER,DETN,20}$ | gün$^{-1}$ | DETN | 20°C sıcaklıkta organik azotun mineralleşme hızı sabiti |
| $\theta_{MINER,DETN}$ | - | DETN | $k_{MINER,DETN,20}$ için Arrhenius sıcaklık düzeltme faktörü |
| $k_{NITR,20}$ | gün$^{-1}$ | NH4N | 20°C sıcaklıkta nitrifikasyon hızı sabiti |
| $\theta_{NITR}$ | - | NH4N | $k_{NITR,20}$ için Arrhenius sıcaklık düzeltme faktörü |
| $k_{HS,NITR,DOXY}$ | g $O_2$·m$^{-3}$ | NH4N | Nitrifikasyonda oksijen için Monod yarı doygunluk katsayısı |
| $k_{DENITR,20}$ | gün$^{-1}$ | NO3N | 20°C sıcaklıkta denitrifikasyon hızı sabiti |
| $\theta_{DENITR}$ | - | NO3N | $k_{DENITR,20}$ için Arrhenius sıcaklık düzeltme faktörü |
| $K_{HS,DENITR,DOXY}$ | g $O_2$·m$^{-3}$ | NO3N | Deitrifikasyonda oksijen için Monod ters yarı doygunluk katsayısı |
| $k_{MINER,DETP,20}$ | gün$^{-1}$ | DETP | 20°C sıcaklıkta organik fosforun mineralleşme hızı sabiti |
| $\theta_{MINER,DETP}$ | - | DETP | $k_{MINER,DETP,20}$ için Arrhenius sıcaklık düzeltme faktörü |
| $k_A$ | gün$^{-1}$ | DOXY | 20°C sıcaklıkta havalanma hızı sabiti |
| $k_{MINER,DETC,20}$ | gün$^{-1}$ | DETC | 20°C sıcaklıkta organik karbonun mineralleşme hızı sabiti |
| $\theta_{MINER,DETC}$ | - | DETC | $k_{MINER,DETC,20}$ için Arrhenius sıcaklık düzeltme faktörü |
| $k_{GROW,GPPC,20}$ | gün$^{-1}$ | GPPC | 20°C sıcaklıkta genel birincil üretici çoğalma hızı sabiti |
| $\theta_{GROW,GPPC}$ | - | GPPC | $k_{GROW,GPPC,20}$ için Arrhenius sıcaklık düzeltme faktörü |
| $k_{HS,N,GPPC}$ | g N·m$^{-3}$ | GPPC | Genel birincil üretici çoğalmasında çözünmüş inorganik azot için Monod yarı doygunluk katsayısı |
| $k_{HS,P,GPPC}$ | g P·m$^{-3}$ | GPPC | Genel birincil üretici çoğalmasında çözünmüş reaktif fosfor için Monod yarı doygunluk katsayısı |
| $k_{RESP,GPPC,20}$ | gün$^{-1}$ | GPPC | 20°C sıcaklıkta genel birincil üretici solunum hızı sabiti |
| $\theta_{RESP,GPPC}$ | - | GPPC | $k_{RESP,GPPC,20}$ için Arrhenius sıcaklık düzeltme faktörü |
| $k_{DEATH,GPPC,20}$ | gün$^{-1}$ | GPPC | 20°C sıcaklıkta Birincil üretici mineralleşme hızı sabiti |
| $\theta_{DEATH,GPPC}$ | - | GPPC | $k_{DEATH,GPPC,20}$ için Arrhenius sıcaklık düzeltme faktörü |
| $pref_{NH4N,PP}$ | - | GPPC | Çözünmüş inorganik azot kaynağı olarak amonyum tercih faktörü $\frac{NH4N + NO3N}{(k_{HS,NH4N,PREF} + NH4N)\cdot(k_{HS,NH4N,PREF} + NO3N)} + \frac{k_{HS,NH4N,PREF}\cdot NH4N}{(NH4N + NO3N)\cdot(k_{HS,NH4N,PREF} + NO3N)}$ |
| $k_{HS,NH4N,PREF}$ | g N·m$^{-3}$ | GPPC | Amonyum tercihi için Monod yarı doygunluk katsayısı |
| $k_{GROW,FIXC,20}$ | gün$^{-1}$ | FIXC | 20°C sıcaklıkta azot sabitleyebilen birincil üretici çoğalma hızı sabiti |
| $\theta_{GROW,FIXC}$ | - | FIXC | $k_{GROW,FIXC,20}$ için Arrhenius sıcaklık düzeltme faktörü |
| $k_{HS,N,FIXC}$ | g N·m$^{-3}$ | FIXC | Azot sabitleyebilen birincil üretici çoğalmasında çözünmüş inorganik azot için Monod yarı doygunluk katsayısı |
| $k_{HS,P,FIXC}$ | g P·m$^{-3}$ | FIXC | Azot sabitleyebilen birincil üretici çoğalmasında çözünmüş reaktif fosfor için Monod yarı doygunluk katsayısı |
| $k_{RESP,FIXC,20}$ | gün$^{-1}$ | FIXC | 20°C sıcaklıkta azot sabitleyebilen birincil üretici solunum hızı sabiti |
| $\theta_{RESP,GPPC}$ | - | FIXC | $k_{RESP,FIXC,20}$ için Arrhenius sıcaklık düzeltme faktörü |
| $k_{DEATH,FIXC,20}$ | gün$^{-1}$ | FIXC | 20°C sıcaklıkta azot sabitleyebilen birincil üretici ölüm hızı sabiti |
| $\theta_{DEATH,FIXC}$ | - | FIXC | $k_{DEATH,FIXC,20}$ için Arrhenius sıcaklık düzeltme faktörü |
| $k_E$ | m$^{-1}$ | GPPC, FIXC | Klorofil-A'nın ışık sönümleme katsayısı $k_E = k_{B,E} + (8.8\cdot10^{-3}\cdot CHLA) + \left(5.4\cdot10^{-2}\cdot CHLA^{\frac{2}{3}}\right)$ |
| $k_{B,E}$ | m$^{-1}$ | GPPC, FIXC | Suyun klorofil A haricinde ışık sönümleme katsayısı |
| $CHLA$ | mg CHLA·m$^{-3}$ | GPPC, FIXC | $1000\cdot\left(S_{CHLA:C,PHYC}\cdot GPPC + S_{CHLA:C,FIXC}\cdot FIXC\right)$ |

GPPC: Birincil üretici karbonu, FIXC: Azot sabitleyebilen birincil üretici karbonu

DETC, DETN, DETP: Sırasıyla ölü organik karbon, azot ve fosfor

NH4N: Amonyum azotu, NO3N: Nitrat azotu

$S_{x,y}$: X:Y stokiyometrik oranı (model için kütle dengeleri kurulurken durum değişkenlerinin birbirlerini etkilediği proseslerde stokiyometrik oranlar dikkate alınmalıdır)

***Şekil 4.3*** *Genel bir su ekosistemi modelinin ekosisteme özel parametre ve yardımcı değişkenleri*

Bu çözümler daha uzun olmakla birlikte, Denklem 13 - Denklem 28'de verilen çözümlere benzemektedir, yalnızca özdeğerleri temsil eden  ifadeleri kapalıdır. Genel bir durum için, böyle bir analitik çözümün türetilmesi Ek-B'de verilmektedir.

## 5. Sonuçlar

Kitap bölümü olarak yayınlanan bu çalışmada iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerinin, su kalitesi ve su ekolojisi açısından sayısal olarak analizi edilmesini sağlayan bir modelleme yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşım, güncel modelleme çalışmalarında kullanılan çoğu su kalitesi/ekolojisi modelinden farklı olarak analitik çözümlere dayanmaktadır. Çalışmada analitik çözümlerle su kalitesi ve/veya su ekolojisi ile ilgili durum değişkenlerinin iklim değişiminin su kaynaklarına iki temel etki değişkeni olan yağış ve hava sıcaklığının doğrudan fonksiyonlarına nasıl dönüştürülebilecekleri gösterilmiştir.

Kısım 2 ve Kısım 3'te de görüldüğü gibi, basit su ekosistemi modellerinin yağış ve hava sıcaklığının fonksiyonları olarak ifade edilmeleri uzun denklemlere dönüşmelerine neden olmaktadır. İlgili denklemlerin doğrudan sunulmalarının çoğu okuyucunun önerilen modelleme yaklaşımını benimsememesi riskini doğuracaktır. Bu nedenle de ilgili kısımlarda denklemlerin en sade hallerinden mümkün olduğunca adım atlanmadan türetilişlerine yer verilerek önerilen yaklaşımın yöntemsel olarak takip edilebilmesine çaba gösterilmiştir. Önerilen model yaklaşımının yöntemsel olarak takip edilebilmesi, aynı yaklaşımın farklı araştırmacılar tarafından farklı modellere de uygulanabilmesini kolaylaştıracaktır.

Kısım 4'te, modelleme yaklaşımını gösterim amacı dışında kullanılabilecek daha gerçekçi modellere yer verilmiştir. Analitik çözümlerin uygulanabileceği son sınırlar ortaya koyulmuştur ve analitik çözümlerin ötesinde aynı modelleme yaklaşımın uygulanabilmesi için sayısal ve analitik çözümlerin nasıl birlikte kullanılabilecekleri yarı-analitik yaklaşım konusunda ipuçları verilmiş ve erilen ipuçlarına dayanarak yapılacak araştırmaların desteklenmesi amacıyla ilgili yarı-analitik yaklaşımın analitik çözümü türetilerek tüm ayrıntıları bu bölümün eklerinde (Ek-B) verilmiştir.

Bu çalışma kapsamında henüz gerçekleştirilmemiş ancak iklim değişikliğinin su ekosistemleri üzerindeki etkilerinin ortaya koyulması açısından önemli olabilecek ek çalışmalar ile ilgili öneriler aşağıda sıralanmıştır:

- Bu çalışmada, su ekosistemlerinin durumlarının yağış ve hava sıcaklığının doğrudan fonksiyonlarına nasıl dönüştürülebilecekleri ortaya koyulmuş ve basit bir örnek üzerinde gösterilmiştir. İlgili yöntemde, yağış ve hava sıcaklığındaki değişimlerin etkileri deterministik olarak hesaplanabilmektedir. Ancak bu iki hidrometerolojik değişkenin de rastlantısal özellikleri vardır. Bu durumda bu durumda sunulan yaklaşım genişletilerek yağış ve hava sıcaklığı olasılık yoğunluk fonksiyonları kullanılıp üretilen bileşik fonksiyonlar ile daha ayrıntılı sonuçlar veren hesap altyapılarının oluşturulması mümkündür. Özellikle dinamik modelleme yaklaşımında ilgili iklim değişimi etkilerinin zamanda ilerleyişlerinde ekosistem tepkilerinin mevsimsel periyot, genel iklim değişimi eğilimi ve rastlantısal değişimler ile ilgili bileşenleri ayrı ayrı ortaya koyulabilir.

- Örnek olarak verilen ekosistem modellerinde, canlı bileşenler kapalı kutu olarak verilmiştir. Bunun nedeni ise, bu çalışmanın bir kitap bölümü hacmi ile sınırlı olmasıdır. Sunulan yaklaşımın temel bileşeni olarak geliştirilen modellerin genişletilerek su ekosistemlerinin besin ağları içindeki canlılar arasındaki etkileşimleri ve iklim değişikliğinin bu etkileşimleri hangi yönlere doğru ve hangi şiddet ile değişmeye zorlamış olduğu geçmişe yönelik tahminlerinin ve zorlayabileceği geleceğe yönelik öngörülerinin yapılmalsını sağlayacak hale getirilmeleri mümkündür. Bu amaçla kurgulanacak bir modelin geliştirilmesindeki ilk adım olarak, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te verilen genel amaçlı su ekosistemi modelinin Ek-B'deki analitik çözümlerle uyumlu biçime dönüştürülmesi ve hayata geçirilmesi önerilmektedir.

## 6. Kaynaklar / References

Abel, Niels Henrik (1824). Mémoire sur les équations algébriques, ou l'on démontre l'impossibilité de la résolution de l'équation générale du cinquième degré" (PDF), in Sylow, Ludwig; Lie, Sophus (eds.), Œuvres Complètes de Niels Henrik Abel (fransızca), Cilt 1(ikinci baskı), Grøndahl & Søn, pp. 28–33.

Arceivala, S.J. (2002). Wastewater Treatment for Pollution Control and Reuse. Tata Publishing

Chapra, S. C. (2008). Surface Water Quality Modeling. MacGraw Hill

King, B. (1996). Beyond the Quartic Equation. Birkhauser yayın evi.

Raudkivi, A.J. (1979). Hydrology: an advanced introduction to hydrological processes and modelling. Oxford, England: Pergamon.

Ruffini, P. (1799). Teoria generale delle equazioni, in cui si dimostra impossibile la soluzione algebraica delle equazioni generali di grado superiore al quarto (italyanca). Stamperia di S. Tommaso d'Aquino.

Stefan, H.G., Preud'homme, E.B. (1993). Stream temperature estimation from air temperature. Water Resources Bulletin, 29(1), pp. 27-45.

Streeter, H.W. and Phelps, E.B. (1925). A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River, U.S. Public Health Service Bulletin, No. 146, pp. 1-75.

Thomann, R.V. and Mueller, J.A. (1987) Principles of Surface Water Quality Modeling and Control. New York: Harper-Collins.

Vollenweider, R. A. (1975). Input-Output Models with Special Reference to Phosphorus Loading Concept in Limnology. *Schweizerische Zeitschrift fur Hydrologie-Swiss Journal of Hydrology*, 37, pp. 53-84.

## EK-A İki Doğrusal Diferansiyel Denklemden Oluşan Sabit Katsayılı Homojen Olmayan Diferansiyel Denklem Takımının Çözümü

Bu ekte, bu bölümde verilen iki değişkenli dinamik model için elde edilecek sembolik çözümler problemden bağımsız türetilmiştir.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}P_1(t)\\P_2(t)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\alpha_{1,1} & \alpha_{1,2}\\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}P_1(t)\\P_2(t)\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}W_1(t)\\W_2(t)\end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.1)}$$

$$t = 0; P_1(t) = P_{1,0};\ P_2(t) = P_{2,0}$$

**P** : Analiz edilen sistemin durumunu temsil eden zamana bağlı, bağımlı değişken vektörü (durum değişkeni vektörü)

**t** : Zaman (bağımsız değişken)

**W** : Sisteme zamana bağlı olarak etki eden dış etki vektörü

$\begin{bmatrix}\alpha_{1,1} & \alpha_{1,2}\\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2}\end{bmatrix}$ : Sistemin W dış etki vektörüne tepkisini temsil eden matris.

Öncelikle, Denklem 1 homojen duruma getirilip (Denklem A.2) çözülmelidir.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}P_1(t)\\P_2(t)\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\alpha_{1,1} & \alpha_{1,2}\\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}P_1(t)\\P_2(t)\end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.2)}$$

Bu amaçla; öncelikle katsayılar matrisinin öz değerleri sembolik olarak hesaplanmalıdır. Denklem A.1 göz önünde bulundurulduğunda özdeğerler, analiz edilen sistemin zamana bağlı değişimlerini temsil eden bileşenlerin içinde bulunan sabitler olacaklardır.

$$det\left(\begin{bmatrix}\alpha_{1,1} & \alpha_{1,2}\\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2}\end{bmatrix} - \lambda\cdot\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\right) = 0 \quad \text{(Denklem A.3)}$$

$$\begin{vmatrix}\alpha_{1,1}-\lambda & \alpha_{1,2}\\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2}-\lambda\end{vmatrix} = 0 \quad \text{(Denklem A.4)}$$

$$\left(\alpha_{1,1}-\lambda\right)\cdot\left(\alpha_{2,2}-\lambda\right) - \alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1} = 0 \quad \text{(Denklem A.5)}$$

$$\alpha_{1,1}\cdot\alpha_{2,2} - \alpha_{1,1}\cdot\lambda - \alpha_{2,2}\cdot\lambda + \lambda^2 - \alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1} = 0 \quad \text{(Denklem A.6)}$$

$$\lambda^2 - \left(\alpha_{1,1}+\alpha_{2,2}\right)\cdot\lambda + \alpha_{1,1}\cdot\alpha_{2,2} - \alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1} = 0 \quad \text{(Denklem A.7)}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{\alpha_{1,1}+\alpha_{2,2} \pm \sqrt{\left(\alpha_{1,1}+\alpha_{2,2}\right)^2 - 4\cdot\left(\alpha_{1,1}\cdot\alpha_{2,2} - \alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}\right)}}{2} \quad \text{(Denklem A.8)}$$

$$\lambda_{1,2} = \frac{\alpha_{1,1} + \alpha_{2,2} \pm \sqrt{\alpha_{1,1}{}^2 + 2 \cdot \alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} + \alpha_{2,2}{}^2 - 4 \cdot \alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}}}{2}$$

(Denklem A.8)

$$\lambda_{1,2} = \frac{\alpha_{1,1} + \alpha_{2,2} \pm \sqrt{\alpha_{1,1}{}^2 - 2 \cdot \alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} + \alpha_{2,2}{}^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}}}{2}$$

(Denklem A.9)

$$\lambda_{1,2} = \frac{\alpha_{1,1} + \alpha_{2,2} \pm \sqrt{(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2})^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}}}{2}$$

(Denklem A.10)

Katsayılar matrisinin elemanları olan $\alpha_{1,1}$, $\alpha_{1,2}$, $\alpha_{2,1}$, $\alpha_{2,2}$ terimlerinin sayısal büyüklükleri, analiz edilen sisteme göre pozitif veya negatif olabilen herhangi sayısal değerler alabilmektedirler. Bu nedenle Denklem A.10 ile hesaplanan özdeğerler; $\sqrt{((a_{1,1} - a_{2,2})^2 + 4 \cdot a_{1,2} \cdot a_{2,1})}$ ifadesine göre; sayısal büyüklükleri birbirlerinden farklı iki gerçek sayı, sayısal değerleri birbirlerinin aynı tek gerçek sayı ya da birbirlerinin eşleniği olan iki tane eşlenik karmaşık sayı olabilmektedirler. Bu üç durumun her birisi, Denklem A.2 için farklı bir biçimdeki bir çözüme karşı gelmektedir.

**Durum I**

Eğer $(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2})^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} > 0$ ise

$$\begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix} = S_1 \cdot \begin{bmatrix} v_{1,1} \\ v_{1,2} \end{bmatrix} \cdot exp(\lambda_1 \cdot t) + S_2 \cdot \begin{bmatrix} v_{2,1} \\ v_{2,2} \end{bmatrix} \cdot exp(\lambda_2 \cdot t)$$

(Denklem A.12)

$$\begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \cdot v_{1,1} \\ S_1 \cdot v_{1,2} \end{bmatrix} \cdot exp(\lambda_1 \cdot t) + \begin{bmatrix} S_2 \cdot v_{2,1} \\ S_2 \cdot v_{2,2} \end{bmatrix} \cdot exp(\lambda_2 \cdot t)$$

(Denklem A.13)

**Durum II**

Eğer $(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2})^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} = 0$ ise

$$\begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix} = S_1 \cdot \begin{bmatrix} v_{1,1} \\ v_{1,2} \end{bmatrix} \cdot exp(\lambda_1 \cdot t) + S_2 \cdot \begin{bmatrix} v_{2,1} \\ v_{2,2} \end{bmatrix} \cdot t \cdot exp(\lambda_2 \cdot t)$$

(Denklem A.14)

$$\begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 \cdot v_{1,1} \\ S_1 \cdot v_{1,2} \end{bmatrix} \cdot exp(\lambda_1 \cdot t) + \begin{bmatrix} S_2 \cdot v_{2,1} \\ S_2 \cdot v_{2,2} \end{bmatrix} \cdot t \cdot exp(\lambda_2 \cdot t)$$

(Denklem A.15)

**Durum III**

Eğer $(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2})^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} < 0$ ise

$$\lambda_1 = \frac{\alpha_{1,1} + \alpha_{2,2}}{2} + \frac{\sqrt{\left|(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2})^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}\right|}}{2} \cdot i = g + z \cdot i \qquad \text{(Denklem A.16)}$$

$$\lambda_2 = \frac{\alpha_{1,1} + \alpha_{2,2}}{2} - \frac{\sqrt{\left|(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2})^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}\right|}}{2} \cdot i = g - z \cdot i \qquad \text{(Denklem A.17)}$$

$$\begin{vmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{vmatrix} = exp(g \cdot t) \cdot \left( S_1 \cdot \begin{vmatrix} v_{1,1} \\ v_{1,2} \end{vmatrix} \cdot cos(z \cdot t) + S_2 \cdot \begin{vmatrix} v_{2,1} \\ v_{2,2} \end{vmatrix} \cdot sin(z \cdot t) \right) \qquad \text{(Denklem A.18)}$$

$$\begin{vmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{vmatrix} = exp(g \cdot t) \cdot \left( S_1 \cdot \begin{vmatrix} v_{1,1} \\ v_{1,2} \end{vmatrix} \cdot cos(z \cdot t) + S_2 \cdot \begin{vmatrix} v_{2,1} \\ v_{2,2} \end{vmatrix} \cdot sin(z \cdot t) \right) \qquad \text{(Denklem A.19)}$$

$S_1$ ve $S_2$ terimleri, analiz edilen probleme göre değerler alacak sabitlerdir. Analiz edilecek problemde, bağımsız değişken zaman olduğu için, bu sabitlerin ifadeleri başlangıç koşulları kullanılarak belirlenecektir. Katsayılar matrisinin öz vektörü de zamana bağlı olmadığı için, sabit olarak verilebilmektedir.

$\beta = S_1 \cdot v1,1$, $\gamma = S_1 \cdot v_{1,2}$, $\delta = S_2 \cdot v_{2,1}$, $\varepsilon = S_2 \cdot v_{2,2}$ tanımları yapılabilinir ve zamana bağlı olmayan sabitler olarak ve analiz edilen probleme göre değerler alırlar. Bu yaklaşımın üstünlüğü, öz vektörlerin hesaplanmasının zor olduğu durumlarda (örneğin özdeğerlerin karmaşık oldukları durumlarda) özvektörlerin hesaplanmasına gerek kalmadan denklem takımının çözülmesinin mümkün olmasıdır.

$$\begin{matrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{matrix} = \begin{cases} Eğer\ (\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2})^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} > 0\ ise \\ \quad \beta \cdot exp(\lambda_1 \cdot t) + \delta \cdot exp(\lambda_2 \cdot t) \\ \quad \gamma \cdot exp(\lambda_1 \cdot t) + \varepsilon \cdot exp(\lambda_2 \cdot t) \\ \quad \square \\ Eğer\ (\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2})^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} = 0\ ise \\ \quad \beta \cdot exp(\lambda_1 \cdot t) + \delta \cdot t \cdot exp(\lambda_2 \cdot t) \\ \quad \gamma \cdot exp(\lambda_1 \cdot t) + \varepsilon \cdot t \cdot exp(\lambda_2 \cdot t) \\ \quad \square \\ Eğer\ (\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2})^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} < 0\ ise \\ \quad exp(g \cdot t) \cdot (\beta \cdot cos(z \cdot t) + \delta \cdot sin(z \cdot t)) \\ \quad exp(g \cdot t) \cdot (\gamma \cdot cos(z \cdot t) + \varepsilon \cdot sin(z \cdot t)) \end{cases} \qquad \text{(Denklem A.20)}$$

Denklem 20'de, Durum III için verilen çözümler;

$exp(g \cdot t) \cdot (\beta \cdot cos(z \cdot t) - \delta \cdot sin(z \cdot t))$ ve $exp(g \cdot t) \cdot (\gamma \cdot cos(z \cdot t) + \varepsilon \cdot sin(z \cdot t))$ daha önce benzer çözümler için verilen $exp(g \cdot t) \cdot (\beta \cdot cos(z \cdot t) - \delta \cdot sin(z \cdot t))$ ve $exp(g \cdot t) \cdot (\gamma \cdot cos(z \cdot t) - \varepsilon \cdot sin(z \cdot t))$ formlarından farklı görünmekle birlikte, $\beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ probleme özel sabitler olduklarından + ve − işaretlerini temsil eden 1 ve -1 katsayıları da bu sabitlerin içine gömülü olarak tanımlanabilir.

Yaklaşımın zayıflığı ise, iki denklem ancak dört bilinmeyen olmasıdır. Bu durumda iki başlangıç koşulu yeterli olmayacaktır. İki koşul daha gereklidir. Bu koşullar ise, sistemin zamana göre değişimini temsil eden türevler yardımıyla belirlenebilir. Buna göre $\beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ sabitlerinin ifadelerini belirlemek için gerekli dört denklemin türetilişi aşağıda verilmektedir.

**Denklem I**

$$t = 0;\ P_1(t) = P_{1,0}$$

$$P_1(0) = P_{1,0} \qquad \text{(Denklem A.21)}$$

**Denklem II**

$$t = 0;\ P_2(t) = P_{2,0}$$

$$P_2(0) = P_{2,0} \qquad \text{(Denklem A.22)}$$

**Denklem III**

$$\left.\frac{dP_1(t)}{dt}\right|_{t=0} = \alpha_{1,1} \cdot P_1(0) + \alpha_{1,2} \cdot P_2(0) \qquad \text{(Denklem A.23)}$$

$$\left.\frac{dP_1(t)}{dt}\right|_{t=0} = \alpha_{1,1} \cdot P_{1,0} + \alpha_{1,2} \cdot P_{2,0} \qquad \text{(Denklem A.24)}$$

**Denklem IV**

$$\left.\frac{dP_1(t)}{dt}\right|_{t=0} = \alpha_{2,1} \cdot P_1(0) + \alpha_{2,2} \cdot P_2(0) \qquad \text{(Denklem A.25)}$$

$$\left.\frac{dP_2(t)}{dt}\right|_{t=0} = \alpha_{2,1} \cdot P_{1,0} + \alpha_{2,2} \cdot P_{2,0} \qquad \text{(Denklem A.26)}$$

Genel türetilişleri yukarıda verilen denklemlerin üç durum için farklı ifadeleri olacaktır. Başlangıç koşulları için Denklem A.28 elde edilmektedir.

$$\begin{matrix} P_{1,0} \\ P_{2,0} \end{matrix} = \begin{cases} Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} > 0\ ise \\ \quad \beta \cdot exp(\lambda_1 \cdot 0) + \delta \cdot exp(\lambda_2 \cdot 0) \\ \quad \gamma \cdot exp(\lambda_1 \cdot 0) + \varepsilon \cdot exp(\lambda_2 \cdot 0) \\ \quad \square \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} = 0\ ise \\ \quad \beta \cdot exp(\lambda_1 \cdot 0) + \delta \cdot t \cdot exp(\lambda_2 \cdot 0) \\ \quad \gamma \cdot exp(\lambda_1 \cdot 0) + \varepsilon \cdot t \cdot exp(\lambda_2 \cdot 0) \\ \quad \square \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} < 0\ ise \\ \quad exp(g \cdot 0) \cdot \left(\beta \cdot cos(z \cdot 0) + \delta \cdot sin(z \cdot 0)\right) \\ \quad exp(g \cdot 0) \cdot \left(\gamma \cdot cos(z \cdot 0) + \varepsilon \cdot sin(z \cdot 0)\right) \end{cases} \quad \text{(Denklem A.27)}$$

$$\begin{matrix} P_{1,0} \\ P_{2,0} \end{matrix} = \begin{cases} Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} > 0\ ise \\ \quad \beta + \delta \\ \quad \gamma + \varepsilon \\ \quad \square \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} = 0\ ise \\ \quad \beta \\ \quad \gamma \\ \quad \square \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} < 0\ ise \\ \quad \beta \\ \quad \gamma \end{cases} \quad \text{(Denklem A.28)}$$

Zamana göre türevlerin ifadeleri, Denklem A.29'da verilmiştir.

$$\begin{matrix}\frac{dP_1(t)}{dt}\\ \vdots \\ \frac{dP_2(t)}{dt}\end{matrix} = \begin{cases} Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}>0\ ise \\ \quad \beta\cdot\lambda_1\cdot exp(\lambda_1\cdot t)+\delta\cdot\lambda_2\cdot exp(\lambda_2\cdot t) \\ \quad \gamma\cdot\lambda_1\cdot exp(\lambda_1\cdot t)+\varepsilon\cdot\lambda_2\cdot exp(\lambda_2\cdot t) \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}=0\ ise \\ \quad \beta\cdot\lambda_1\cdot exp(\lambda_1\cdot t)+\delta\cdot(\lambda_2+1)\cdot exp(\lambda_2\cdot t) \\ \quad \gamma\cdot\lambda_1\cdot exp(\lambda_1\cdot t)+\varepsilon\cdot(\lambda_2+1)\cdot exp(\lambda_2\cdot t) \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}<0\ ise \\ \quad \beta\cdot exp(g\cdot t)\cdot(cos(z\cdot t)\cdot g-sin(z\cdot t)\cdot z)+ \\ \quad\quad \delta\cdot exp(g\cdot t)\cdot(cos(z\cdot t)\cdot z+sin(z\cdot t)\cdot g) \\ \quad \vdots \\ \quad \gamma\cdot exp(g\cdot t)\cdot(cos(z\cdot t)\cdot g-sin(z\cdot t)\cdot z) \\ \quad\quad \varepsilon\cdot exp(g\cdot t)\cdot(cos(z\cdot t)\cdot z+sin(z\cdot t)\cdot g) \end{cases} \quad \text{(Denklem A.29[12])}$$

Denklem A.29'da zaman yerine sıfır koyulunca, başlangıç anındaki türevler elde edilmektedir (Denklem A.31). Denklem A.21, A.22, A.24, A.26 ve Denklem A. 31 birlikte ele alınarak, öz değerlerin tüm durumlarında, sabitlerini veren denklemler yazılabilir.

$$\begin{matrix}\left.\frac{dP_1(t)}{dt}\right|_{t=0}\\ \vdots \\ \left.\frac{dP_2(t)}{dt}\right|_{t=0}\end{matrix} = \begin{cases} Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}>0\ ise \\ \quad \beta\cdot\lambda_1\cdot exp(\lambda_1\cdot 0)+\delta\cdot\lambda_2\cdot exp(\lambda_2\cdot 0) \\ \quad \gamma\cdot\lambda_1\cdot exp(\lambda_1\cdot 0)+\varepsilon\cdot\lambda_2\cdot exp(\lambda_2\cdot 0) \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}=0\ ise \\ \quad \beta\cdot\lambda_1\cdot exp(\lambda_1\cdot 0)+\delta\cdot(\lambda_2+1)\cdot exp(\lambda_2\cdot 0) \\ \quad \gamma\cdot\lambda_1\cdot exp(\lambda_1\cdot 0)+\varepsilon\cdot(\lambda_2+1)\cdot exp(\lambda_2\cdot 0) \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}<0\ ise \\ \quad \beta\cdot exp(g\cdot 0)\cdot(cos(z\cdot 0)\cdot g-sin(z\cdot 0)\cdot z)+ \\ \quad\quad \delta\cdot exp(g\cdot 0)\cdot(cos(z\cdot 0)\cdot z+sin(z\cdot 0)\cdot g) \\ \quad \vdots \\ \quad \gamma\cdot exp(g\cdot 0)\cdot(cos(z\cdot 0)\cdot g-sin(z\cdot 0)\cdot z)+ \\ \quad\quad \varepsilon\cdot exp(g\cdot 0)\cdot(cos(z\cdot 0)\cdot z+sin(z\cdot 0)\cdot g) \end{cases} \quad \text{(Denklem A.30)}$$

[12] $(a_{1,1}-a_{2,2})^2+4\cdot a_{1,2}\cdot a_{2,1}<0$ *durumu için çözümün türev ifadesinin için elde edilişi, aşağıda verilmekte olup, için aynı adımlar izlenmiştir.*

$$\frac{dP_1(t)}{dt}=\frac{d}{dt}\left(exp(g\cdot t)\cdot(\beta\cdot cos(z\cdot t)+\delta\cdot sin(z\cdot t))\right)=\frac{d}{dt}(exp(g\cdot t)\cdot\beta\cdot cos(z\cdot t))+\frac{d}{dt}(exp(g\cdot t)\cdot\delta\cdot sin(z\cdot t))=$$
$$\beta\cdot\left(\frac{d}{dt}(exp(g\cdot t)\cdot cos(z\cdot t))\right)+\delta\cdot\left(\frac{d}{dt}(exp(g\cdot t)\cdot sin(z\cdot t))\right)=$$
$$\beta\cdot\left(exp(g\cdot t)\cdot\frac{d}{dt}cos(z\cdot t)+cos(z\cdot t)\cdot\frac{d}{dt}exp(g\cdot t)\right)+\delta\cdot\left(exp(g\cdot t)\cdot\frac{d}{dt}sin(z\cdot t)+sin(z\cdot t)\cdot\frac{d}{dt}exp(g\cdot t)\right)=$$
$$-\beta\cdot(exp(g\cdot t)\cdot sin(z\cdot t)\cdot z+cos(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)\cdot g)+\delta\cdot(exp(g\cdot t)\cdot cos(z\cdot t)\cdot z+sin(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)\cdot g)=$$
$$\beta\cdot exp(g\cdot t)\cdot(cos(z\cdot t)\cdot g-sin(z\cdot t)\cdot z)+\delta\cdot exp(g\cdot t)\cdot(cos(z\cdot t)\cdot z+sin(z\cdot t)\cdot g)$$

$$\left.\frac{dP_1(t)}{dt}\right|_{t=0} \\ \vdots \\ \left.\frac{dP_2(t)}{dt}\right|_{t=0} = \begin{cases} Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}>0\ ise \\ \quad \beta\cdot\lambda_1+\delta\cdot\lambda_2 \\ \quad \gamma\cdot\lambda_1+\varepsilon\cdot\lambda_2 \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}=0\ ise \\ \quad \beta\cdot\lambda_1+\delta\cdot(\lambda_2+1) \\ \quad \gamma\cdot\lambda_1+\varepsilon\cdot(\lambda_2+1) \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}<0\ ise \\ \quad \beta\cdot g+\delta\cdot z \\ \quad \gamma\cdot g+\varepsilon\cdot z \end{cases} \qquad \text{(Denklem A.31)}$$

$$\begin{cases} Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}>0\ ise \\ \quad \beta+\delta=P_{1,0} \\ \quad \gamma+\varepsilon=P_{2,0} \\ \quad \lambda_1\cdot\beta+\lambda_2\cdot\delta=\alpha_{1,1}\cdot P_{1,0}+\alpha_{1,2}\cdot P_{2,0} \\ \quad \lambda_1\cdot\gamma+\lambda_2\cdot\varepsilon=\alpha_{2,1}\cdot P_{1,0}+\alpha_{2,2}\cdot P_{2,0} \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}=0\ ise \\ \quad \beta=P_{1,0} \\ \quad \gamma=P_{2,0} \\ \quad \lambda_1\cdot\beta+(\lambda_2+1)\cdot\delta=\alpha_{1,1}\cdot P_{1,0}+\alpha_{1,2}\cdot P_{2,0} \\ \quad \lambda_1\cdot\gamma+(\lambda_2+1)\cdot\varepsilon=\alpha_{2,1}\cdot P_{1,0}+\alpha_{2,2}\cdot P_{2,0} \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}<0\ ise \\ \quad \beta=P_{1,0} \\ \quad \gamma=P_{2,0} \\ \quad g\cdot\beta+z\cdot\delta=\alpha_{1,1}\cdot P_{1,0}+\alpha_{1,2}\cdot P_{2,0} \\ \quad g\cdot\gamma+z\cdot\varepsilon=\alpha_{2,1}\cdot P_{1,0}+\alpha_{2,2}\cdot P_{2,0} \end{cases} \qquad \text{(Denklem A.32)}$$

$$
\begin{cases}
\text{Eğer } (\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2})^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}>0 \text{ ise} \\
\quad \beta=P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2} \\
\quad \gamma=P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2} \\
\quad \delta=P_{1,0}\cdot\left(1-\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\right)+P_{2,0}\cdot\dfrac{-\alpha_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2} \\
\quad \varepsilon=P_{1,0}\cdot\dfrac{-\alpha_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}+P_{2,0}\cdot\left(1-\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\right) \\
\text{Eğer } (\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2})^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}=0 \text{ ise} \\
\quad \beta=P_{1,0} \\
\quad \gamma=P_{2,0} \\
\quad \delta=P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_1}{\lambda_2+1}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{\lambda_2+1} \\
\quad \varepsilon=P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{\lambda_2+1}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_1}{\lambda_2+1} \\
\text{Eğer } (\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2})^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}<0 \text{ ise} \\
\quad \beta=P_{1,0} \\
\quad \gamma=P_{2,0} \\
\quad \delta=P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,1}-g}{z}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{z} \\
\quad \varepsilon=P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{z}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,2}-g}{z}
\end{cases}
$$

(Denklem A.33[13,14,15])

[13] $(a_{1,1}-a_{2,2})^2+4\cdot a_{1,2}\cdot a_{2,1})>0$ *durumu için*
*Denklem I ve II düzenlenerek* $\delta=P_{1,0}-\beta$; $\varepsilon=P_{2,0}-\gamma$ *sırasıyla Denklem III ve Denklem IV'te yerine koyuluca elde edilen* $\lambda_1\cdot\beta+\lambda_2\cdot(P_{1,0}-\beta)=a_{1,1}\cdot P_{1,0}+a_{1,2}\cdot P_{2,0}$ *ve* $\lambda_1\cdot\gamma+\lambda_2\cdot(P_{2,0}-\gamma)=a_{2,1}\cdot P_{1,0}+a_{2,2}\cdot P_{2,0}$ *denklemleri düzenlenip,* $(\lambda_1-\lambda_2)\cdot\beta=P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-\lambda_2)+a_{1,2}\cdot P_{2,0}$ *ve* $(\lambda_1-\lambda_2)\cdot\gamma=a_{2,1}\cdot P_{1,0}+P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-\lambda_2)$, *sırasıyla* $\beta$ *ve* $\gamma$ *sabitleri bu denklemlerin sol taraflarında yalnız bırakılarak,* $\beta=P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-\lambda_2)\ (\lambda_1-\lambda_2)+P_{2,0}\cdot\ a_{1,2}/(\lambda_1-\lambda_2)$ *ve* $\gamma=P_{1,0}\cdot a_{2,1}/(\lambda_1-\lambda_2)+P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-\lambda_2)/(\lambda_1-\lambda_2)$ *sabitlerden ikisinin ifadesi elde edilir.* $\beta$ *ve* $\gamma$ *terimleri,* $\delta=P_{1,0}-\beta$; $\varepsilon=P_{2,0}-\gamma$ *yerlerine koyulunca;* $\delta=P_{1,0}-P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-\lambda_2)/(\lambda_1-\lambda_2)-P_{2,0}\cdot a_{1,2}/(\lambda_1-\lambda_2)$ *ve* $\varepsilon=P_{2,0}-P_{1,0}\cdot a_{2,1}/(\lambda_1-\lambda_2)-P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-\lambda_2)/(\lambda_1-\lambda_2)$ *denklemler* $P_{1,0}$ *ve* $P_{2,0}$ *parantezine alınınca* $\delta=P_{1,0}\cdot(1-(a_{1,1}-\lambda_2)/(\lambda_1-\lambda_2))+P_{2,0}\cdot(-a_{1,2})/(\lambda_1-\lambda_2)$ *ve* $\varepsilon=P_{1,0}\cdot(-a_{2,1})/(\lambda_1-\lambda_2)+P_{2,0}\cdot(1-(a_{2,2}-\lambda_2)/(\lambda_1-\lambda_2))$ *elde* $\delta$ *ve* $\varepsilon$ *sabitlerinin ifadeleri edilir.*

[14] $(a_{1,1}-a_{2,2})^2+4\cdot a_{1,2}\cdot a_{2,1}=0$ *durumu için*
$\beta$ *ve* $\gamma$ *sabitleri bilindiğinden, doğrudan Denklem III ve Denklem IV'te yerlerine koyularak çözümü* $\delta$ *ve* $\varepsilon$ *sabitlerinin ifadeleri* $\lambda_1\cdot P_{1,0}+(\lambda_2+1)\cdot\delta=a_{1,1}\cdot P_{1,0}+a_{1,2}\cdot P_{2,0}$ *ve* $\lambda_1\cdot P_{2,0}+(\lambda_2+1)\cdot\varepsilon=a_{2,1}\cdot P_{1,0}+a_{2,2}\cdot P_{2,0}$ *olarak doğrudan elde edilir.* $\delta$ *ve* $\varepsilon$ *sabitleri denklemlerde* $(\lambda_2+1)\cdot\delta=a_{1,1}\cdot P_{1,0}-\lambda_1\cdot P_{1,0}+a_{1,2}\cdot P_{2,0}$; $(\lambda_2+1)\cdot\varepsilon=a_{2,1}\cdot P_{1,0}+a_{2,2}\cdot P_{2,0}-\lambda_1\cdot P_{2,0}$; $(\lambda_2+1)\cdot\delta=P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-\lambda_1)+a_{1,2}\cdot P_{2,0}$, $(\lambda_2+1)\cdot\varepsilon=P_{1,0}\cdot a_{2,1}+P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-\lambda_1)$ *ve* $\delta=P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-\lambda_1)/(\lambda_2+1)+P_{2,0}\,a_{1,2}/(\lambda_2+1)$,
$\varepsilon=P_{1,0}\cdot a_{2,1}/(\lambda_2+1)+P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-\lambda_1)/(\lambda_2+1)$ *işlemleri sonucunda yalnız bırakılmış ve ifadeleri düzenlenmiş olarak elde edilmiş olur.*

[15] $(a_{1,1}-a_{2,2})^2+4\cdot a_{1,2}\cdot a_{2,1}<0$ *durumu için*
$\beta$ *ve* $\gamma$ *sabitleri bilindiğinden, doğrudan Denklem III ve Denklem IV'te yerlerine koyularak çözümü* $\delta$ *ve* $\varepsilon$ *sabitlerinin ifadeleri* $g\cdot P_{1,0}+z\cdot\delta=a_{1,1}\cdot P_{1,0}+a_{1,2}\cdot P_{2,0}$ *ve* $g\cdot P_{2,0}+z\cdot\varepsilon=a_{2,1}\cdot P_{1,0}+a_{2,2}\cdot P_{2,0}$ *olarak doğrudan elde edilir.* $\delta$ *ve* $\varepsilon$ *sabitleri denklemlerde* $z\cdot\delta=a_{1,1}\cdot P_{1,0}-g\cdot P_{1,0}+a_{1,2}\cdot P_{2,0}$; $z\cdot\varepsilon=a_{2,1}\cdot P_{1,0}+a_{2,2}\cdot P_{2,0}-g\cdot P_{2,0}$;
$z\cdot\delta=P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-g)+a_{1,2}\cdot P_{2,0}$, $z\cdot\varepsilon=P_{1,0}\cdot a_{2,1}+P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-g)$ *ve* $\delta=P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-g)/z+P_{2,0}\cdot a_{1,2}/z$,
$\varepsilon=P_{1,0}\cdot a_{2,1}/z+P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-g)/z$ *işlemleri sonucunda yalnız bırakılmış ve ifadeleri düzenlenmiş olarak elde edilmiş olur.*

Denklem A.33, Denklem A.20'de yerine koyulup (Denklem A.34) düzenlenince (Denklem A.35) homojen çözümler elde edilir.

$$\begin{matrix} P_1(t)_{HOMOJEN} \\ P_2(t)_{HOMOJEN} \end{matrix} = \begin{cases} Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}>0\ ise \\ \quad \left(P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2}\right)\cdot exp(\lambda_1\cdot t)+\left(P_{1,0}\cdot\left(1-\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\right)+P_{2,0}\cdot\dfrac{-\alpha_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2}\right)\cdot exp(\lambda_2\cdot t) \\ \quad \left(P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\right)\cdot exp(\lambda_1\cdot t)+\left(P_{1,0}\cdot\dfrac{-\alpha_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}+P_{2,0}\cdot\left(1-\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\right)\right)\cdot exp(\lambda_2\cdot t) \\ \square \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}=0\ ise \\ \quad P_{1,0}\cdot exp(\lambda_1\cdot t)+\left(P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_1}{\lambda_2+1}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{\lambda_2+1}\right)\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t) \\ \quad P_{2,0}\cdot exp(\lambda_1\cdot t)+\left(P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{\lambda_2+1}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_1}{\lambda_2+1}\right)\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t) \\ \square \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}<0\ ise \\ \quad exp(g\cdot t)\cdot\left(P_{1,0}\cdot cos(z\cdot t)+\left(P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,1}-g}{z}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{z}\right)\cdot sin(z\cdot t)\right) \\ \quad exp(g\cdot t)\cdot\left(P_{2,0}\cdot cos(z\cdot t)+\left(P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{z}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,2}-g}{z}\ \right)\cdot sin(z\cdot t)\right) \end{cases}$$

(Denklem A.34)

$$\begin{matrix} P_1(t)_{HOMOJEN} \\ P_2(t)_{HOMOJEN} \end{matrix} = \begin{cases} Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}>0\ ise \\ \quad P_{1,0}\cdot\left(\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)-exp(\lambda_2\cdot t)\right)+exp(\lambda_2\cdot t)\right)+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)-exp(\lambda_2\cdot t)\right) \\ \quad P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)-exp(\lambda_2\cdot t)\right)+P_{2,0}\cdot\left(\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)-exp(\lambda_2\cdot t)\right)+exp(\lambda_2\cdot t)\right) \\ \square \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}=0\ ise \\ \quad P_{1,0}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)+\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_1}{\lambda_2+1}\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t)\right)+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{\lambda_2+1}\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t) \\ \quad P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{\lambda_2+1}\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t)+P_{2,0}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)+\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_1}{\lambda_2+1}\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t)\right) \\ \square \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}<0\ ise \\ \quad P_{1,0}\cdot exp(g\cdot t)\cdot\left(cos(z\cdot t)+\dfrac{\alpha_{1,1}-g}{z}\cdot sin(z\cdot t)\right)+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{z}\cdot exp(g\cdot t)\cdot sin(z\cdot t) \\ \quad P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{z}\cdot exp(g\cdot t)\cdot sin(z\cdot t)+P_{2,0}\cdot exp(g\cdot t)\cdot\left(cos(z\cdot t)+\dfrac{\alpha_{2,2}-g}{z}\cdot sin(z\cdot t)\right) \end{cases}$$

(Denklem A.35)

Sistemin çözümü, homojen çözümler ile özel çözümlerin lineer kombinasyonudur (Denklem A.36)

$$\begin{bmatrix} P_1(t)_{HOMOJEN} \\ P_2(t)_{HOMOJEN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1(t)_{HOMOJEN} \\ P_2(t)_{HOMOJEN} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_1(t)_{\text{ÖZEL}} \\ P_2(t)_{\text{ÖZEL}} \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.36)}$$

**W(t) = W Olması Durumu İçin Çözüm**

Bu durumda, homojen olmayan kısım zamana göre sabittir ve bu nedenle özel çözümlerin zamana göre türevleri sıfır olacaklarından, özel çözümler için sabit fonksiyonlar denenebilir (Denklem A.37).

$$\begin{bmatrix} P_{1,\text{ÖZEL}} \\ P_{2,\text{ÖZEL}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.37)}$$

Denklem 37, v Denklem1'de yerine koyulunca Denklem 39 elde edilir.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.38)}$$

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.39)}$$

Denklem A.39'un çözümü özel çözümleri verecektir (Denklem A.45)

$$\begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.40)}$$

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.41)}$$

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = -\frac{\begin{bmatrix} \alpha_{2,2} & -\alpha_{1,2} \\ -\alpha_{2,1} & \alpha_{1,1} \end{bmatrix}}{det\left(\begin{bmatrix} \alpha_{1,1} & \alpha_{1,2} \\ \alpha_{2,1} & \alpha_{2,2} \end{bmatrix}\right)} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.42)}$$

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = -\frac{\begin{bmatrix} \alpha_{2,2} & -\alpha_{1,2} \\ -\alpha_{2,1} & \alpha_{1,1} \end{bmatrix}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.43)}$$

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_2 \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} \frac{\alpha_{2,2}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} & -\frac{\alpha_{1,2}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} \\ -\frac{\alpha_{2,1}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} & \frac{\alpha_{1,1}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ \vdots \\ W_2 \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.44)}$$

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -W_1 \cdot \dfrac{\alpha_{2,2}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} + W_2 \cdot \dfrac{\alpha_{1,2}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} \\ W_1 \cdot \dfrac{\alpha_{2,1}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} - W_2 \cdot \dfrac{\alpha_{1,1}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.45)}$$

Denklem A.45, Denklem A.37'de yerine koyularak özel çözümler elde edilir.

$$\begin{bmatrix} P_{1,ÖZEL} \\ \vdots \\ P_{2,ÖZEL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -W_1 \cdot \dfrac{\alpha_{2,2}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} + W_2 \cdot \dfrac{\alpha_{1,2}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} \\ W_1 \cdot \dfrac{\alpha_{2,1}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} - W_2 \cdot \dfrac{\alpha_{1,1}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.46)}$$

$$\alpha'_{1,1} = -\frac{\alpha_{2,2}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} ; \alpha'_{1,2} = \frac{\alpha_{1,2}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} ; \alpha'_{2,1} = \frac{\alpha_{2,1}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}} \quad \text{ve}$$

$$\alpha'_{2,2} = -\frac{\alpha_{1,1}}{\alpha_{1,1} \cdot \alpha_{2,2} - \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1}}$$

olarak tanımlanıp, Denklem 46 da yerlerine koyulduklarında (Denklem A.47 elde edilir).

$$\begin{bmatrix} P_{1,ÖZEL} \\ P_{2,ÖZEL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 \cdot \alpha'_{1,1} + W_2 \cdot \alpha'_{1,2} \\ W_1 \cdot \alpha'_{2,1} + W_2 \cdot \alpha'_{2,2} \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem A.47)}$$

Denklem A.44 ve Denklem A.20, Denklem A.36 da yerlerine koyulduklarında Denklem A.48 elde edilir.

$$\begin{matrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{matrix} = \begin{cases} Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} > 0\ ise \\ \quad \beta \cdot exp(\lambda_1 \cdot t) + \delta \cdot exp(\lambda_2 \cdot t) + W_1 \cdot \alpha'_{1,1} + W_2 \cdot \alpha'_{1,2} \\ \quad \gamma \cdot exp(\lambda_1 \cdot t) + \varepsilon \cdot exp(\lambda_2 \cdot t) + W_1 \cdot \alpha'_{2,1} + W_2 \cdot \alpha'_{2,2} \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} = 0\ ise \\ \quad \beta \cdot exp(\lambda_1 \cdot t) + \delta \cdot t \cdot exp(\lambda_2 \cdot t) + W_1 \cdot \alpha'_{1,1} + W_2 \cdot \alpha'_{1,2} \\ \quad \gamma \cdot exp(\lambda_1 \cdot t) + \varepsilon \cdot t \cdot exp(\lambda_2 \cdot t) + W_1 \cdot \alpha'_{2,1} + W_2 \cdot \alpha'_{2,2} \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} < 0\ ise \\ \quad exp(g \cdot t) \cdot \left(\beta \cdot cos(z \cdot t) + \delta \cdot sin(z \cdot t)\right) + W_1 \cdot \alpha'_{1,1} + W_2 \cdot \alpha'_{1,2} \\ \quad exp(g \cdot t) \cdot \left(\gamma \cdot cos(z \cdot t) + \varepsilon \cdot sin(z \cdot t)\right) + W_1 \cdot \alpha'_{2,1} + W_2 \cdot \alpha'_{2,2} \end{cases} \quad \text{(Denklem A.48)}$$

***β, γ, δ, ε*** sabitlerinin ifadelerini belirlemek için gerekli dört denklemin ikisi başlangıç koşullarından diğer ikisi de başlangıç anındaki zamansal türevlerden elde edilecektir. Dört denklemin türetilişi aşağıda verilmektedir.

**Denklem V**

$$t = 0;\ P_1(t) = P_{1,0} \qquad \text{(Denklem A.49)}$$

$$P_1(0) = P_{1,0}$$

**Denklem VI**

$$t = 0;\ P_2(t) = P_{2,0} \qquad \text{(Denklem A.50)}$$

$$P_2(0) = P_{2,0}$$

**Denklem VII**

$$\left.\frac{dP_1(t)}{dt}\right|_{t=0} = \alpha_{1,1} \cdot P_1(0) + \alpha_{1,2} \cdot P_2(0) + W_1 \qquad \text{(Denklem A.51)}$$

$$\left.\frac{dP_1(t)}{dt}\right|_{t=0} = \alpha_{1,1} \cdot P_{1,0} + \alpha_{1,2} \cdot P_{2,0} + W_1 \qquad \text{(Denklem A.52)}$$

**Denklem VIII**

$$\left.\frac{dP_1(t)}{dt}\right|_{t=0} = \alpha_{2,1} \cdot P_1(0) + \alpha_{2,2} \cdot P_2(0) + W_2$$

$$\left.\frac{dP_2(t)}{dt}\right|_{t=0} = \alpha_{2,1} \cdot P_{1,0} + \alpha_{2,2} \cdot P_{2,0} + +W_2 \qquad \text{(Denklem A.53)}$$

Denklem V ve Denklem VI'nın türetilmeleri için, Denklem A.48'de zaman yerine sıfır koyularak Denklem A.55 elde edilir. Homojen olmayan kısımlar zamana göre sabit olduklarından, zaman türevinin Denklem A.29'daki ifadeleri değişmeyecektir. Buna göre kurulan dört bilinmeyenli dört denklemden oluşan denklem takımı, Denklem A.56'da verilmektedir. Denklem takımının sabitleri için çözümü ise, Denklem A.57'de verilmektedir. Denklem A.57, Denklem A.48'de yerine koyulunca Denklem A.58, Denklem A.58 düzenlenince Denklem A.59 elde edilir.

$$\begin{matrix} P_{1,0} \\ P_{2,0} \end{matrix} = \begin{cases} Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} > 0\ ise \\ \quad \beta \cdot exp(0) + \delta \cdot exp(0) + W_1 \cdot \alpha'_{1,1} + W_2 \cdot \alpha'_{1,2} \\ \quad \gamma \cdot exp(0) + \varepsilon \cdot exp(0) + W_1 \cdot \alpha'_{2,1} + W_2 \cdot \alpha'_{2,2} \\ \quad \square \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} = 0\ ise \\ \quad \beta \cdot exp(0) + \delta \cdot t \cdot exp(0) + W_1 \cdot \alpha'_{1,1} + W_2 \cdot \alpha'_{1,2} \\ \quad \gamma \cdot exp(0) + \varepsilon \cdot t \cdot exp(0) + W_1 \cdot \alpha'_{2,1} + W_2 \cdot \alpha'_{2,2} \\ \quad \square \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} < 0\ ise \\ \quad exp(0) \cdot \left(\beta \cdot cos(0) + \delta \cdot sin(0)\right) + W_1 \cdot \alpha'_{1,1} + W_2 \cdot \alpha'_{1,2} \\ \quad exp(0) \cdot \left(\gamma \cdot cos(0) + \varepsilon \cdot sin(0)\right) + W_1 \cdot \alpha'_{2,1} + W_2 \cdot \alpha'_{2,2} \end{cases} \qquad \text{(Denklem A.54)}$$

$$\begin{matrix} P_{1,0} \\ P_{2,0} \end{matrix} = \begin{cases} Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} > 0\ ise \\ \quad \beta + \delta + W_1 \cdot \alpha'_{1,1} + W_2 \cdot \alpha'_{1,2} \\ \quad \gamma + \varepsilon + W_1 \cdot \alpha'_{2,1} + W_2 \cdot \alpha'_{2,2} \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} = 0\ ise \\ \quad \beta + W_1 \cdot \alpha'_{1,1} + W_2 \cdot \alpha'_{1,2} \\ \quad \gamma + W_1 \cdot \alpha'_{2,1} + W_2 \cdot \alpha'_{2,2} \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} < 0\ ise \\ \quad \beta + W_1 \cdot \alpha'_{1,1} + W_2 \cdot \alpha'_{1,2} \\ \quad \gamma + W_1 \cdot \alpha'_{2,1} + W_2 \cdot \alpha'_{2,2} \end{cases} \qquad \text{(Denklem A.55)}$$

$$\begin{matrix} P_{1,0} \\ P_{2,0} \end{matrix} = \begin{cases} Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} > 0\ ise \\ \quad \beta + \delta = P_{1,0} - W_1 \cdot \alpha'_{1,1} - W_2 \cdot \alpha'_{1,2} \\ \quad \gamma + \varepsilon = P_{2,0} - W_1 \cdot \alpha'_{2,1} - W_2 \cdot \alpha'_{2,2} \\ \quad \lambda_1 \cdot \beta + \lambda_2 \cdot \delta = \alpha_{1,1} \cdot P_{1,0} + \alpha_{1,2} \cdot P_{2,0} + W_1 \\ \quad \lambda_1 \cdot \gamma + \lambda_2 \cdot \varepsilon = \alpha_{2,1} \cdot P_{1,0} + \alpha_{2,2} \cdot P_{2,0} + W_2 \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} = 0\ ise \\ \quad \beta = P_{1,0} - W_1 \cdot \alpha'_{1,1} - W_2 \cdot \alpha'_{1,2} \\ \quad \gamma = P_{2,0} - W_1 \cdot \alpha'_{2,1} - W_2 \cdot \alpha'_{2,2} \\ \quad \lambda_1 \cdot \beta + (\lambda_2 + 1) \cdot \delta = \alpha_{1,1} \cdot P_{1,0} + \alpha_{1,2} \cdot P_{2,0} + W_1 \\ \quad \lambda_1 \cdot \gamma + (\lambda_2 + 1) \cdot \varepsilon = \alpha_{2,1} \cdot P_{1,0} + \alpha_{2,2} \cdot P_{2,0} + W_2 \\ \quad \vdots \\ Eğer\ \left(\alpha_{1,1} - \alpha_{2,2}\right)^2 + 4 \cdot \alpha_{1,2} \cdot \alpha_{2,1} < 0\ ise \\ \quad \beta = P_{1,0} - W_1 \cdot \alpha'_{1,1} - W_2 \cdot \alpha'_{1,2} \\ \quad \gamma = P_{2,0} - W_1 \cdot \alpha'_{2,1} - W_2 \cdot \alpha'_{2,2} \\ \quad g \cdot \beta + z \cdot \delta = \alpha_{1,1} \cdot P_{1,0} + \alpha_{1,2} \cdot P_{2,0} + W_1 \\ \quad g \cdot \gamma + z \cdot \varepsilon = \alpha_{2,1} \cdot P_{1,0} + \alpha_{2,2} \cdot P_{2,0} + W_2 \end{cases} \qquad \text{(Denklem A.56)}$$

$$
\begin{bmatrix} P_{1,0} \\ P_{2,0} \end{bmatrix} = \begin{cases}
Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}>0\ ise \\
\beta = P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2}+W_1\cdot\dfrac{1+\lambda_2\cdot\alpha'_{1,1}}{\lambda_1-\lambda_2}+W_2\cdot\dfrac{\lambda_2\cdot\alpha'_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2} \\
\gamma = P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}+W_1\cdot\dfrac{\lambda_2\cdot\alpha'_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}+W_2\cdot\dfrac{1+\lambda_2\cdot\alpha'_{2,2}}{\lambda_1-\lambda_2} \\
\delta = P_{1,0}\cdot\left(1-\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\right)+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2}+W_1\cdot\left(-\alpha'_{1,1}-\dfrac{1+\lambda_2\cdot\alpha'_{1,1}}{\lambda_1-\lambda_2}\right)+W_2\cdot\left(-\alpha'_{1,2}-\dfrac{\lambda_2\cdot\alpha'_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2}\right) \\
\varepsilon = P_{1,0}\cdot\dfrac{-\alpha_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}+P_{2,0}\cdot\left(1-\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\right)+W_1\cdot\left(-\alpha'_{2,1}-\dfrac{\lambda_2\cdot\alpha'_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}\right)+W_2\cdot\left(-\alpha'_{2,2}-\dfrac{1+\lambda_2\cdot\alpha'_{2,2}}{\lambda_1-\lambda_2}\right) \\
\square \\
Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}=0\ ise \\
\beta = P_{1,0}-W_1\cdot\alpha'_{1,1}-W_2\cdot\alpha'_{1,2} \\
\gamma = P_{2,0}-W_1\cdot\alpha'_{2,1}-W_2\cdot\alpha'_{2,2} \\
\delta = P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_1}{\lambda_2+1}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{\lambda_2+1}+W_1\cdot\dfrac{1+\lambda_1\cdot\alpha'_{1,1}}{\lambda_2+1}+W_2\cdot\dfrac{\lambda_1\cdot\alpha'_{1,2}}{\lambda_2+1} \\
\varepsilon = P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{\lambda_2+1}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_1}{\lambda_2+1}+W_1\cdot\dfrac{\lambda_1\cdot\alpha'_{2,1}}{\lambda_2+1}+W_2\cdot\dfrac{1+\lambda_1\cdot\alpha'_{2,2}}{\lambda_2+1} \\
\square \\
Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}<0\ ise \\
\beta = P_{1,0}-W_1\cdot\alpha'_{1,1}-W_2\cdot\alpha'_{1,2} \\
\gamma = P_{2,0}-W_1\cdot\alpha'_{2,1}-W_2\cdot\alpha'_{2,2} \\
\delta = P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,1}-g}{z}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{z}+W_1\cdot\dfrac{1+g\cdot\alpha'_{1,1}}{z}+W_2\cdot\dfrac{g\cdot\alpha'_{1,2}}{z} \\
\varepsilon = P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{z}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,2}-g}{z}+W_1\cdot\dfrac{g\cdot\alpha'_{2,1}}{z}+W_2\cdot\dfrac{1+g\cdot\alpha'_{2,2}}{z}
\end{cases}
$$

(Denklem A.57[16,17,18])

[16] $(a_{1,1}-a_{2,2})^2+4\cdot a_{1,2}\cdot a_{2,1}>0$ *durumu için*
*Denklem V ve VI düzenlenerek* $\delta = P_{1,0}-W_1\cdot a'_{1,1}-W_2\cdot a'_{1,2}-\beta$; $\varepsilon = P_{2,0}-W_1\cdot a'_{2,1}-W_2\cdot a'_{2,2}-\gamma$ *sırasıyla Denklem VII ve Denklem VIII'de yerine koyulunca elde edilen* $\lambda_1\cdot\beta+\lambda_2\cdot(P_{1,0}-W_1\cdot a'_{1,1}-W_2\cdot a'_{1,2}-\beta)=a_{1,1}\cdot P_{1,0}+a_{1,2}\cdot P_{2,0}+W_1$ *ve* $\lambda_1\cdot\gamma+\lambda_2\cdot(P_{2,0}-W_1\cdot a'_{2,1}-W_2\cdot a'_{2,2}-\gamma)=a_{2,1}\cdot P_{1,0}+a_{2,2}\cdot P_{2,0}+W_2$ *denklemleri düzenlenip,* $(\lambda_1-\lambda_2)\cdot\beta=P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-\lambda_2)+a_{1,2}\cdot P_{2,0}+W_1+W_1\cdot\lambda_2\cdot a'_{1,1}+W_2\cdot\lambda_2\cdot a'_{1,2}$ *ve*$(\lambda_1-\lambda_2)\cdot\gamma=a_{2,1}\cdot P_{1,0}+P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-\lambda_2)+W_1\cdot\lambda_2\cdot a'_{2,1}+W_2+W_2\cdot\lambda_2\cdot a'_{2,2}$, *sırasıyla* $\beta$ *ve* $\gamma$ *sabitleri bu denklemlerin sol taraflarında yalnız bırakılarak,* $\beta=P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-\lambda_2)/(\lambda_1-\lambda_2)+P_{2,0}\cdot a_{1,2}/(\lambda_1-\lambda_2)+W_1\cdot(1+\lambda_2\cdot a^{\wedge}{}'_{1,1})/(\lambda_1-\lambda_2)+W_2\cdot(\lambda_2\cdot a'_{1,2})/(\lambda_1-\lambda_2)$ *ve* $\gamma=P_{1,0}\cdot a_{2,1}/(\lambda_1-\lambda_2)+P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-\lambda_2)/(\lambda_1-\lambda_2)+W_1\cdot(\lambda_2\cdot a'_{2,1})/(\lambda_1-\lambda_2)+W_2\cdot(1+\lambda_2\cdot a'_{2,2})/(\lambda_1-\lambda_2)$ *sabitlerden ikisinin ifadesi elde edilir.* $\beta$ *ve* $\gamma$ *terimleri,* $\delta = P_{1,0}-W_1\cdot a'_{1,1}-W_2\cdot a'_{1,2}-\beta$; $\varepsilon = P_{2,0}-W_1\cdot a'_{2,1}-W_2\cdot a'_{2,2}-\gamma$ *yerlerine koyulunca;* $\delta=P_{1,0}-W_1\cdot a'_{1,1}-W_2\cdot a'_{1,2}-P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-\lambda_2)/(\lambda_1-\lambda_2)-P_{2,0}\cdot a_{1,2}/(\lambda_1-\lambda_2)-W_1\cdot(1+\lambda_2\cdot a'_{1,1})/(\lambda_1-\lambda_2)-W_2\cdot(\lambda_2\cdot a'_{1,2})/(\lambda_1-\lambda_2)$ *ve* $\varepsilon=P_{2,0}-W_1\cdot a'_{2,1}-W_2\cdot a'_{2,2}-P_{1,0}\cdot a_{2,1}/(\lambda_1-\lambda_2)-P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-\lambda_2)/(\lambda_1-\lambda_2)-W_1\cdot(\lambda_2\cdot a'_{2,1})/(\lambda_1-\lambda_2)-W_2\cdot(1+\lambda_2\cdot a'_{2,2})/(\lambda_1-\lambda_2)$ *denklemleri* $P_{1,0}, P_{2,0}, W_1, W_2$, *parantezlerine alınıp* $\delta=P_{1,0}\cdot(1-(a_{1,1}-\lambda_2)/(\lambda_1-\lambda_2))+P_{2,0}\cdot a_{1,2}/(\lambda_1-\lambda_2)+W_1\cdot(-a'_{1,1}-(1+\lambda_2\cdot a'_{1,1})/(\lambda_1-\lambda_2))+W_2\cdot(-a'_{1,2}-(\lambda_2\cdot a'_{1,2})/(\lambda_1-\lambda_2))$ *ve* $\varepsilon=P_{1,0}\cdot-a_{2,1}/(\lambda_1-\lambda_2)+P_{2,0}\cdot(1-(a_{2,2}-\lambda_2)/(\lambda_1-\lambda_2))+W_1\cdot(-a'_{2,1}-(\lambda_2\cdot a'_{2,1})/(\lambda_1-\lambda_2))+W_2\cdot(-a'_{2,2}-(1+\lambda_2\cdot a'_{2,2})/(\lambda_1-\lambda_2))$ *olarak* $\delta$ *ve* $\varepsilon$ *sabitlerinin ifadeleri elde edilir.*

[17] $(a_{1,1}-a_{2,2})^2+4\cdot a_{1,2}\cdot a_{(2,1)}=0$ *durumu için*
$\beta$ *ve* $\gamma$ *sabitleri bilindiğinden, doğrudan Denklem VII ve Denklem VIII'de yerlerine koyularak çözümü* $\delta$ *ve* $\varepsilon$ *sabitlerinin ifadeleri* $\lambda_1\cdot(P_{1,0}-W_1\cdot a'_{1,1}-W_2\cdot a'_{1,2})+(\lambda_2+1)\cdot\delta=a_{1,1}\cdot P_{1,0}+a_{1,2}\cdot P_{2,0}+W_1$ *ve* $\lambda_1\cdot(P_{2,0}-W_1\cdot a'_{2,1}-W_2\cdot a'_{2,2})+(\lambda_2+1)\cdot\varepsilon=a_{2,1}\cdot P_{1,0}+a_{2,2}\cdot P_{2,0}+W_2$ *olarak doğrudan elde edilir.* $\delta$ *ve* $\varepsilon$ *sabitleri denklemlerde* $(\lambda_2+1)\cdot\delta=a_{1,1}\cdot P_{1,0}-\lambda_1\cdot P_{1,0}+a_{1,2}\cdot P_{2,0}+W_1+W_1\cdot\lambda_1\cdot a'_{1,1}+W_2\cdot\lambda_1\cdot a'_{1,2}$, $(\lambda_2+1)\cdot\varepsilon=a_{2,1}\cdot P_{1,0}+a_{2,2}\cdot P_{2,0}-\lambda_1\cdot P_{2,0}+W_1\cdot\lambda_1\cdot a'_{2,1}+W_2+W_2\cdot\lambda_1\cdot a'_{2,2}$; $(\lambda_2+1)\cdot\delta=P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-\lambda_1)+a_{1,2}\cdot P_{2,0}+W_1\cdot(1+\lambda_1\cdot a'_{1,1})+W_2\cdot\lambda_1\cdot a'_{1,2}$, $(\lambda_2+1)\cdot\varepsilon=P_{1,0}\cdot a_{2,1}+P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-\lambda_1)+W_1\cdot\lambda_1\cdot a'_{2,1}+W_2\cdot(1+\lambda_1\cdot a'_{2,2})$ *ve* $\delta=P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-\lambda_1)/(\lambda_2+1)+P_{2,0}\cdot a_{1,2}/(\lambda_2+1)+W_1\cdot(1+\lambda_1\cdot a'_{1,1})/(\lambda_2+1)+W_2\cdot(\lambda_1\cdot a'_{1,2})/(\lambda_2+1)$, $\varepsilon=P_{1,0}\cdot a_{2,1}/(\lambda_2+1)+P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-\lambda_1)/(\lambda_2+1)+W_1\cdot(\lambda_1\cdot a'_{2,1})/(\lambda_2+1)+W_2\cdot(1+\lambda_1\cdot a'_{2,2})/(\lambda_2+1)$ *işlemleri sonucunda yalnız bırakılmış ve ifadeleri düzenlenmiş olarak elde edilmiş olur.*

[18] $(a_{1,1}-a_{2,2})^2+4\cdot a_{1,2}\cdot a_{2,1}<0$ durumu için
$\beta$ ve $\gamma$ sabitleri bilindiğinden, doğrudan Denklem VII ve Denklem VIII'de yerlerine koyularak çözümü $\delta$ ve $\varepsilon$ sabitlerinin ifadeleri $g\cdot(P_{1,0}-W_1\cdot a'_{1,1}-W_2\cdot a'_{1,2})+z\cdot\delta=a_{1,1}\cdot P_{1,0}+a_{1,2}\cdot P_{2,0}+W_1$ *ve* $g\cdot(P_{2,0}-W_1\cdot a'_{2,1}-W_2\cdot a'_{2,2})+z\cdot\varepsilon=a_{2,1}\cdot P_{1,0}+a_{2,2}\cdot P_{2,0}$ olarak doğrudan elde edilir. $\delta$ ve $\varepsilon$ sabitleri denklemlerde $z\cdot\delta=a_{1,1}\cdot P_{1,0}-\lambda_1\cdot P_{1,0}+a_{1,2}\cdot P_{2,0}+W_1+W_1\cdot g\cdot a'_{1,1}+W_2\cdot g\cdot a'_{1,2}$, $z\cdot\varepsilon=a_{2,1}\cdot P_{1,0}+a_{2,2}\cdot P_{2,0}-\lambda_1\cdot P_{2,0}+W_1\cdot g\cdot a'_{2,1}+W_2+W_2\cdot g\cdot a'_{2,2}$; $z\cdot\delta=P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-\lambda_1)+a_{1,2}\cdot P_{2,0}+W_1\cdot(1+g\cdot a'_{1,1})+W_2\cdot g\cdot a'_{1,2}$, $z\cdot\varepsilon=P_{1,0}\cdot a_{2,1}+P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-\lambda_1)+W_1\cdot g\cdot a'_{2,1}+W_2\cdot(1+g\cdot a'_{2,2})$ ve $\delta=P_{1,0}\cdot(a_{1,1}-g)/z+P_{2,0}\cdot a_{1,2}/z+W_1\cdot(1+g\cdot a'_{1,1})/z+W_2\cdot(g\cdot a'_{1,2})/z$, $\varepsilon=P_{1,0}\cdot a_{2,1}/z+P_{2,0}\cdot(a_{2,2}-g)/z+W_1\cdot(g\cdot a_{2,1})/z+W_2\cdot(1+g\cdot a'_{2,2})/z$ işlemleri sonucunda yalnız bırakılmış ve ifadeleri düzenlenmiş olarak elde edilmiş olur.

$$
\begin{matrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{matrix} = \begin{cases}
Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}>0\ ise \\
\left(P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2}+W_1\cdot\dfrac{1+\lambda_2\cdot\alpha'_{1,1}}{\lambda_1-\lambda_2}+W_2\cdot\dfrac{\lambda_2\cdot\alpha'_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2}\right)\cdot exp(\lambda_1\cdot t)+ \\
\left(P_{1,0}\cdot\left(1-\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\right)+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2}+W_1\cdot\left(-\alpha'_{1,1}-\dfrac{1+\lambda_2\cdot\alpha'_{1,1}}{\lambda_1-\lambda_2}\right)+W_2\cdot\left(-\alpha'_{1,2}-\dfrac{\lambda_2\cdot\alpha'_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2}\right)\right)\cdot exp(\lambda_2\cdot t)+ \\
W_1\cdot\alpha'_{1,1}+W_2\cdot\alpha'_{1,2} \\
\vdots \\
\left(P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}+W_1\cdot\dfrac{\lambda_2\cdot\alpha'_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}+W_2\cdot\dfrac{1+\lambda_2\cdot\alpha'_{2,2}}{\lambda_1-\lambda_2}\right)\cdot exp(\lambda_1\cdot t)+ \\
\left(P_{1,0}\cdot\dfrac{-\alpha_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}+P_{2,0}\cdot\left(1-\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\right)+W_1\cdot\left(-\alpha'_{2,1}-\dfrac{\lambda_2\cdot\alpha'_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}\right)+W_2\cdot\left(-\alpha'_{2,2}-\dfrac{1+\lambda_2\cdot\alpha'_{2,2}}{\lambda_1-\lambda_2}\right)\right)\cdot exp(\lambda_2\cdot t)+ \\
W_1\cdot\alpha'_{2,1}+W_2\cdot\alpha'_{2,2} \\
\vdots \\
\vdots \\
Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}=0\ ise \\
\left(P_{1,0}-W_1\cdot\alpha'_{1,1}-W_2\cdot\alpha'_{1,2}\right)\cdot exp(\lambda_1\cdot t)+ \\
\left(P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,1}-\lambda_1}{\lambda_2+1}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{\lambda_2+1}+W_1\cdot\dfrac{1+\lambda_1\cdot\alpha'_{1,1}}{\lambda_2+1}+W_2\cdot\dfrac{\lambda_1\cdot\alpha'_{1,2}}{\lambda_2+1}\right)\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t)+W_1\cdot\alpha'_{1,1}+W_2\cdot\alpha'_{1,2} \\
\vdots \\
\left(P_{2,0}-W_1\cdot\alpha'_{2,1}-W_2\cdot\alpha'_{2,2}\right)\cdot exp(\lambda_1\cdot t)+ \\
\left(P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{\lambda_2+1}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,2}-\lambda_1}{\lambda_2+1}+W_1\cdot\dfrac{\lambda_1\cdot\alpha'_{2,1}}{\lambda_2+1}+W_2\cdot\dfrac{1+\lambda_1\cdot\alpha'_{2,2}}{\lambda_2+1}\right)\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t)+W_1\cdot\alpha'_{2,1}+W_2\cdot\alpha'_{2,2} \\
\vdots \\
\vdots \\
Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}<0\ ise \\
exp(g\cdot t)\cdot\left(\left(P_{1,0}-W_1\cdot\alpha'_{1,1}-W_2\cdot\alpha'_{1,2}\right)\cdot cos(z\cdot t)+\right. \\
\left.\left(P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,1}-g}{z}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{1,2}}{z}+W_1\cdot\dfrac{1+g\cdot\alpha'_{1,1}}{z}+W_2\cdot\dfrac{g\cdot\alpha'_{1,2}}{z}\right)\cdot sin(z\cdot t)\right)+W_1\cdot\alpha'_{1,1}+W_2\cdot\alpha'_{1,2} \\
\vdots \\
exp(g\cdot t)\cdot\left(\left(P_{2,0}-W_1\cdot\alpha'_{2,1}-W_2\cdot\alpha'_{2,2}\right)\cdot cos(z\cdot t)+\right. \\
\left.\left(P_{1,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,1}}{z}+P_{2,0}\cdot\dfrac{\alpha_{2,2}-g}{z}+W_1\cdot\dfrac{g\cdot\alpha'_{2,1}}{z}+W_2\cdot\dfrac{1+g\cdot\alpha'_{2,2}}{z}\right)\cdot sin(z\cdot t)\right)+W_1\cdot\alpha'_{2,1}+W_2\cdot\alpha'_{2,2}
\end{cases}
$$

(Denklem A.58)

$$
\begin{matrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{matrix} = \begin{cases}
Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}>0\ ise \\
P_{1,0}\cdot\left(\frac{\alpha_{1,1}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)-exp(\lambda_2\cdot t)\right)+exp(\lambda_2\cdot t)\right)+P_{2,0}\cdot\frac{\alpha_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)-exp(\lambda_2\cdot t)\right)+ \\
W_1\cdot\left(\frac{1+\lambda_2\cdot\alpha'_{1,1}}{\lambda_1-\lambda_2}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)-exp(\lambda_2\cdot t)\right)+\alpha'_{1,1}\cdot\left(1-exp(\lambda_2\cdot t)\right)\right)+W_2\cdot\left(\frac{\lambda_2\cdot\alpha'_{1,2}}{\lambda_1-\lambda_2}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)-exp(\lambda_2\cdot t)\right)+\alpha'_{1,2}\cdot\left(1-exp(\lambda_2\cdot t)\right)\right) \\
\square \\
P_{1,0}\cdot\frac{\alpha_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)-exp(\lambda_2\cdot t)\right)+P_{2,0}\cdot\left(\frac{\alpha_{2,2}-\lambda_2}{\lambda_1-\lambda_2}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)-exp(\lambda_2\cdot t)\right)+exp(\lambda_2\cdot t)\right)+ \\
W_1\cdot\left(\frac{\lambda_2\cdot\alpha'_{2,1}}{\lambda_1-\lambda_2}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)-exp(\lambda_2\cdot t)\right)+\alpha'_{2,1}\cdot\left(1-exp(\lambda_2\cdot t)\right)\right)+W_2\cdot\left(\frac{1+\lambda_2\cdot\alpha'_{2,2}}{\lambda_1-\lambda_2}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)-exp(\lambda_2\cdot t)\right)+\alpha'_{2,2}\cdot\left(1-exp(\lambda_2\cdot t)\right)\right) \\
\square \\
\square \\
Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}=0\ ise \\
P_{1,0}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)+\frac{\alpha_{1,1}-\lambda_1}{\lambda_2+1}\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t)\right)+P_{2,0}\cdot\frac{\alpha_{1,2}}{\lambda_2+1}\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t)+ \\
W_1\cdot\left(\frac{1+\lambda_1\cdot\alpha'_{1,1}}{\lambda_2+1}\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t)+\alpha'_{1,1}\cdot\left(1-exp(\lambda_1\cdot t)\right)\right)+W_2\cdot\left(\frac{\lambda_1\cdot\alpha'_{1,2}}{\lambda_2+1}\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t)+\alpha'_{1,2}\cdot\left(1-exp(\lambda_1\cdot t)\right)\right) \\
\square \\
P_{1,0}\cdot\frac{\alpha_{2,1}}{\lambda_2+1}\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t)+P_{2,0}\cdot\left(exp(\lambda_1\cdot t)+\frac{\alpha_{2,2}-\lambda_1}{\lambda_2+1}\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t)\right)+ \\
W_1\cdot\left(\frac{\lambda_1\cdot\alpha'_{2,1}}{\lambda_2+1}\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t)+\alpha'_{2,1}\cdot\left(1-exp(\lambda_1\cdot t)\right)\right)+W_2\cdot\left(\frac{1+\lambda_1\cdot\alpha'_{2,2}}{\lambda_2+1}\cdot t\cdot exp(\lambda_2\cdot t)+\alpha'_{2,2}\cdot\left(1-exp(\lambda_1\cdot t)\right)\right) \\
\square \\
\square \\
Eğer\ \left(\alpha_{1,1}-\alpha_{2,2}\right)^2+4\cdot\alpha_{1,2}\cdot\alpha_{2,1}<0\ ise \\
P_{1,0}\cdot\left(cos(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)+\frac{\alpha_{1,1}-g}{z}\cdot sin(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)\right)+P_{2,0}\cdot\frac{\alpha_{1,2}}{z}\cdot sin(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)+ \\
W_1\cdot\left(\frac{1+g\cdot\alpha'_{1,1}}{z}\cdot sin(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)+\alpha'_{1,1}\cdot\left(1-cos(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)\right)\right)+W_2\cdot\left(\frac{g\cdot\alpha'_{1,2}}{z}\cdot sin(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)+\alpha'_{1,2}\cdot\left(1-cos(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)\right)\right) \\
\square \\
P_{1,0}\cdot\frac{\alpha_{2,1}}{z}\cdot sin(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)+P_{2,0}\cdot\left(cos(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)+\frac{\alpha_{2,2}-g}{z}\cdot sin(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)\right)+ \\
W_1\cdot\left(\frac{g\cdot\alpha'_{2,1}}{z}\cdot sin(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)+\alpha'_{2,1}\cdot\left(1-cos(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)\right)\right)+W_2\cdot\left(\frac{1+g\cdot\alpha'_{2,2}}{z}\cdot sin(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)+\alpha'_{2,2}\cdot\left(1-cos(z\cdot t)\cdot exp(g\cdot t)\right)\right)
\end{cases}
$$

(Denklem A.59

## EK-B Dört Kompartmandan Daha Çok Sayıda Bileşen İçeren Doğrusal Modeller İçin Analitik Bir Çözüm Önerisi

Abel-Ruffini teoremine göre, katsayılar matrisi 4 x 4'ten büyük ise bu mümkün değildir. Ancak bu çalışmada, çözümlerin analitik olarak yapılması gerekli görülmektedir. Bu ekte sabit kastayılı homojen olmayan ancak homojen olmayan terimi sabit olan bir doğrusal diferansiyel denklem takımının başlangıç koşulları ve dış zorlayıcı etkenlerin etkilerini birbirlerinden ayrı fonksiyonlar ile ifade edebilen bir analitik çözüm türetilecektir. Burada en önemli koşul, katsayılar matrisinin özdeğerlerinin ve özvektörlerinin sayısal olarak hesaplanabilmesi ve katsayılar matrisinin tersinin alınabiliyor olmasıdır.

$$\frac{d}{dt}[P_i(t)]_{n\,x\,1} = [A]_{n\,x\,n} \cdot [P_i(t)]_{n\,x\,1} + [B_i]_{n\,x\,1} \qquad \text{(Denklem B.1)}$$

Denklem B.1'de; İlgilenilen problemde analiz edilen sisteme göre

$n$ : Bileşen sayısını temsil eden skaler

$[A]_{n\,x\,n}$ : Dış etkenlere verilen tepkiyi temsil eden katsayılar matrisi

$[B_i]_{n\,x\,1}$ : Etki eden dış etkenler vektörü

$[P_i(t)]_{n\,x\,1}$ : Bağımlı değişken (durum değişkeni) için çözüm vektörü

$t$ : Bağımsız değişken

anlamındadır. Amaç, Denklem B.1'in biçimi Denklem B.2'de verilen bir çözümünü elde etmektir.

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1} = \underbrace{f_{BAŞ}(t) \cdot [P_{0,i}]_{n\,x\,1}}_{\text{Başlangıç koşullarının etkisi}} + \underbrace{f_{DIŞ}(t) \cdot [B_i]_{n\,x\,1}}_{\text{Dış etkenlerin etkisi}} \qquad \text{(Denklem B.2)}$$

Denklem B.2'de

$[P_{0,i}]_{n\,x\,1}$ : t=0 için sistemin durumunu temsil eden başlangıç koşulları vektörü

$f_{BAŞ}(t)$ : t'nin bir fonksiyonu olarak başlangıç koşullarının sistemin durumu üzerindeki etkisini ortaya koyan çarpan fonksiyonu

$f_{DIŞ}(t)$ : t'nin bir fonksiyonu olarak dış etkenlerin sistemin durumu üzerindeki etkisini ortaya koyan çarpan fonksiyonu

anlamındadır. Bu tür bir çözüm; iki, üç ve dört bileşenden oluşan sistemler için sembolik olarak yapılabilmektedir. Ancak beş ve daha büyük sistemler için özdeğer ve özvektörlerin özel durumlar dışında sembolik olarak elde edilememeleri nedeniyle analitik çözümler elde edilebilmekle birlikte özdeğer ve özvektörler ancak sayısal olarak hesaplanabilmekte ve bu nedenle çözümlerin sembolik olarak ifade edilmesi mümkün olamamakla birlikte, bu ekte en azından denklem takımı çözümlerinin sistemin başlangıç koşullarının ve dış etkenlerinin birer fonksiyonu olarak gösterebilen biçimdeki bir çözümünün nasıl elde edilebileceği gösterilmiştir.

### B.1 Denklem Takımının Özdeğer ve Özvektörler Kullanılarak Çözülmesi

Amaca ulaşmak için; Denklem B.1 ile verilen diferansiyel denklem takımının çözülmesi gerekmektedir. İlgili çözümün ilk adımı temsil edilen ve homojen olmayan sistemin homojen çözümünün elde edilmesidir. Denklem B.1'in homojen hali ise Denklem B.3 olup

$$\frac{d}{dt}[P_i(t)]_{n\,x\,1} = [A]_{n\,x\,n} \cdot [P_i(t)]_{n\,x\,1} \qquad \text{(Denklem B.3)}$$

çözümünün bariz yapısı, Denklem B.4'te verilmektedir.

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1,H} = \sum_{i=1}^{n} \left( C_{H,i} \cdot [v_i]_{n\,x\,1} \cdot f_i(\lambda_i, t) \right) \qquad \text{(vDenklem B.4)}$$

Denklem B.4'te;

$[P_i(t)]_{n\,x\,1,H}$ : Bağımsız değişkenin bir fonksiyonu olan homojen çözüm

$\lambda_i$ : [A]_(n x n) matrisinin i indeksi özdeğeri[19]

$[v_i]_{n\,x\,1}$ : λ_i özdeğerine karşı gelen özvektör

$f_i(\lambda_i)$ : λ_i ve t'nin bir fonksiyonu olan homojen çözüm bileşeni [20]

$C_{H,i}$ : Sayısal değeri homojenleştirilmiş probleme göre oluşan i indeksli keyfi sabit

anlamındadır. ve t'nin bir fonksiyonu olan homojen çözüm bileşeninin bilinen genel özelliği Denklem B.5'te verilmektedir.

$$f_i(\lambda_i, 0) = 1 \qquad \text{(Denklem B.5)}$$

[19] *Eğer ≤ 4 ise analitik veya simgesel olarak belirlenebilir, değilse özel durumlar haricinde ancak sayısal olarak hesaplanabilir.*

[20] *Bu fonksiyonlar, özdeğerlerin gerçek, karmaşık ya da tekrarlı olmaları durumuna göre farklı biçimlerde olacaklardır. Ayrıntılar, B.2 kısmında verilmiştir.*

Bağımsız değişken t için tanımlanan başlangıç koşulu,

$$t=0;\ [P_i(t)]_{n\,x\,1,H} = [P_{0,i}]_{n\,x\,1} \qquad \text{(Denklem B.6)}$$

Denklem B.5 ve C.6; Denklem B.4'te yerine koyulduğunda

$$[P_{0,i}]_{n\,x\,1} = \sum_{i=1}^{n} (C_{H,i} \cdot [v_i]_{n\,x\,1}) = C_{H,1} \cdot [v_1]_{n\,x\,1} + C_{H,2} \cdot [v_2]_{n\,x\,1} + \cdots + C_{H,n} \cdot [v_n]_{n\,x\,1}$$

(Denklem B.7)

Denklem B.7 elde edilir. olarak tanımlanırsa [21]; Denklem B.7, Denklem B.8'e dönüşür.[22]

$$[E_\lambda]_{n\,x\,n} \cdot [C_{H,i}]_{n\,x\,1} = [P_{0,i}]_{n\,x\,1} \qquad \text{(Denklem B.8)}$$

Denklem B.8'doğrusal bir denklem takımı olup, $[E_\lambda]_{n\,x\,n}$ özdeğer ve özvektör hesabı sonucunda belirlemiş olduğundan ve $[P_{0,i}]_{n\,x\,1}$ problemin başlangıç koşulu olarak tanımlanmış olduğu için bilindiğinden, herhangi bir yöntem ile çözülebilir ve homojen çözüm için probleme göre oluşan i indeksli keyfi sabitlerin tümü belirlenmiş olur. Denklem B.4'te homojen olmayan terim bulunmadığına göre; $[P_{0,i}]_{n\,x\,1}$ ve $[B]_{n\,x\,1}$ dikkate alındığında, $[C_{H,i}]_{n\,x\,1}$ yalnızca $[P_{0,i}]_{n\,x\,1}$ vektörünün bir fonksiyonudur (Denklem B.9).

$$[C_{H,i}]_{n\,x\,1} = f_{H,i}\,([P_{0,i}]_{n\,x\,1}) \qquad \text{(Denklem B.9)}$$

Denklem B.1'in çözümü ise homojen çözüm ile homojen olmayan çözümün doğrusal kombinasyonudur (Denklem B.10).

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1} = \left(\sum_{i=1}^{n} \left(C_{T,i} \cdot [v_i]_{n\,x\,1} \cdot f_i(\lambda_i, t)\right)\right) + [P_i(t)]_{n\,x\,1,P} \qquad \text{(Denklem B.10)}$$

Bu denklemde,

$C_{T,i}$ : Sayısal değeri probleme göre oluşan i indeksli keyfi sabit

$[P_i(t)]_{n\,x\,1,P}$ : Denklem B.1'in özel çözümü

anlamındadır. Homojen olmayan terim, bağımsız değişkene göre sabit olduğundan bu terimin etkisi ile ilgili çözümün ifadesinin bağımsız değişkene göre türevi de sıfıra eşit olacaktır (Denklem B.11).

$$\frac{d}{dt}[P_{0,i}]_{n\,x\,1,P} = 0 \qquad \text{(Denklem B.11)}$$

---

[21] *Bu tanım, lineer cebirde özuzay olarak bilinmektedir.*

[22] $\sum_{i=1}^{n}(C_{H,i} \cdot [v_i]_{n\,x\,1}) = \sum_{i=1}^{n}([v_i]_{n\,x\,1} \cdot C_{H,i}) = \underbrace{[[v_1]_{n\,x\,1}, [v_2]_{n\,x\,1}, \cdots, [v_n]_{n\,x\,1}]}_{[E_\lambda]_{n\,x\,n}} \cdot [C_{H,i}]_{n\,x\,1}$

Öte yandan, özel çözüm, Denklem B.1'i sağlamalıdır (Denklem B.12).

$$\frac{d}{dt}\left[P_{i,0}\right]_{n\,x\,1,P} = [A]_{n\,x\,n} \cdot \left[P_{0,i}\right]_{n\,x\,1,P} + [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.12)}$$

Denklem B.11 ve Denklem B.12'den elde edilen Denklem B.13 elde edilir.

$$\frac{d}{dt}\left[P_{i,0}\right]_{n\,x\,1,P} = [A]_{n\,x\,n} \cdot \left[P_{0,i}\right]_{n\,x\,1,P} + [B_i]_{n\,x\,1} = 0 \quad \text{(Denklem B.13)}$$

Denklem B.13 düzenlenince doğrusal bir denklem takımı olan Denklem B.14 elde edilir.

$$[A]_{n\,x\,n} \cdot \left[P_{0,i}\right]_{n\,x\,1,P} = -[B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.14)}$$

Denklem B.14'ün iki tarafı katsayılar matrisinin tersi ile çarpılırsa; özel çözüm, , homojen olmayan terimin bir vektör fonksiyonu olarak elde edilir.

$$\left[P_{0,i}\right]_{n\,x\,1,P} = -inv([A]_{n\,x\,n}) \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.15)}$$

İfadesinden de anlaşılabileceği gibi, özel çözüm $[\boldsymbol{P}_{0,i}]_{n\,x\,1}$ ve $[\boldsymbol{B}_i]_{n\,x\,1}$ dikkate alındığında, $[\boldsymbol{C}_{T,i}]_{n\,x\,1}$ yalnızca

$[\boldsymbol{B}_i]_{n\,x\,1}$ vektörünün bir fonksiyonudur. Denklem B.15'in sağ tarafı, Denklem B.10'da yerine koyulunca, Denklem B.16 elde edilir.

$$[P(t)]_{n\,x\,1} = \left(\sum_{i=1}^{n}\left(C_{T,i} \cdot [v_i]_{n\,x\,1} \cdot f_i(\lambda_i, t)\right)\right) - inv([A]_{n\,x\,n}) \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.16)}$$

$\boldsymbol{C}_{T,i}$ keyfi sabitlerini elde etmek için başlangıç koşulu, Denklem B.16'da yerine koyulduğunda Denklem B.17 elde edilir.

$$[P_{i,0}]_{n\,x\,1} = \left(\sum_{i=1}^{n}(C_{T,i} \cdot [v_i]_{n\,x\,1})\right) - inv([A]_{n\,x\,n}) \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.17)}$$

olarak tanımlanıp Denklem B.17'de yerine koyulunca Denklem B.18, Denklem B.18 düzenlenince Denklem B.19 elde edilir.

$$\left[P_{i,0}\right]_{n\,x\,1} = [E_\lambda]_{n\,x\,n} \cdot \left[C_{T,i}\right]_{n\,x\,1} - inv([A]_{n\,x\,n}) \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.18)}$$

$$[E_\lambda]_{n\,x\,n} \cdot \left[C_{T,i}\right]_{n\,x\,1} = \left[P_{0,i}\right]_{n\,x\,1} + inv([A]_{n\,x\,n}) \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.19)}$$

Doğrusal bir denklem takımı olan Denklem B.19 çözülünce keyfi sabitleri elde edilecektir. Burada dikkat edilmesi gereken; keyfi sabitlerinin yalnızca ve dikkate alındığında, yalnızca bağımsız değişkene göre başlangıç koşullarını temsil eden vektörünün bir fonksiyonu olan (Denklem B.9) sabitlerinden farklı olarak hem vektörünün hem de homojen olmayan bileşeni temsil eden vektörünün fonksiyonu olmasıdır (Denklem B.20).

$$[C_{T,i}]_{n\,x\,1} = f_{T,i}\left([P_{0,i}]_{n\,x\,1}, [B]_{n\,x\,1}\right) \quad \text{(Denklem B.20)}$$

Denklem B.8 ve C.19 düzenlenince, sırasıyla

$$[P_{0,i}]_{n\,x\,1} = [E_\lambda]_{n\,x\,n} \cdot [C_{H,i}]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.21)}$$

$$[P_{0,i}]_{n\,x\,1} = [E_\lambda]_{n\,x\,n} \cdot [C_{T,i}]_{n\,x\,1} - inv([A]_{n\,x\,n}) \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.22)}$$

Denklem B.21 ve Denklem B.22 elde edilmektedir. Hem Denklem B.21 hem de Denklem B.22'nin sol tarafları başlangıç koşulunu temsil eden  vektörüne ve bu nedenle birbirlerine eşit oldukları için, sağ tarafları da birbirlerine eşitlenebilir ve bu işlem sonucunda Denklem B.23 elde edilir.

$$[E_\lambda]_{n\,x\,n} \cdot [C_{T,i}]_{n\,x\,1} - [E_\lambda]_{n\,x\,n} \cdot [C_{H,i}]_{n\,x\,1} = inv([A]_{n\,x\,n}) \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.23)}$$

Denklem B.23 düzenlenerek Denklem B.26 elde edilir.

$$[E_\lambda]_{n\,x\,n} \cdot \left([C_{T,i}]_{n\,x\,1} - [C_{H,i}]_{n\,x\,1}\right) = inv([A]_{n\,x\,n}) \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.24)}$$

$$inv([E_\lambda]_{n\,x\,n}) \cdot [E_\lambda]_{n\,x\,n} \cdot \left([C_{T,i}]_{n\,x\,1} - [C_{H,i}]_{n\,x\,1}\right) = inv([E_\lambda]_{n\,x\,n}) \cdot inv([A]_{n\,x\,n}) \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.25)}$$

$$[C_{T,i}]_{n\,x\,1} - [C_{H,i}]_{n\,x\,1} = inv([E_\lambda]_{n\,x\,n}) \cdot inv([A]_{n\,x\,n}) \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.26)}$$

Denklem B.26'ya yakından bakıldığında

$$\underbrace{[C_{T,i}]_{n\,x\,1}}_{f_{T,i}\left([P_{i,0}]_{n\,x\,1}, [B]_{n\,x\,1}\right)} - \underbrace{[C_{H,i}]_{n\,x\,1}}_{f_{H,i}\left([P_{i,0}]_{n\,x\,1}\right)} = \underbrace{\underbrace{inv([E_\lambda]_{n\,x\,n}) \cdot inv([A]_{n\,x\,n})}_{f_A([A]_{n\,x\,n})} \cdot [B_i]_{n\,x\,1}}_{f_B([A]_{n\,x\,n}, [B_i]_{n\,x\,1})}$$

$[C_{T,i}]_{n\,x\,1}$ - $[C_{H,i}]_{n\,x\,1}$ farkının, $[P_{0,i}]_{n\,x\,1}$ ve $[B_i]_{n\,x\,1}$ vektörleri dikkate alınınca, yalnızca $[B_i]_{n\,x\,1}$ vektörüne bağlı bir fonksiyon olduğu anlaşılmaktadır.  Bu durum, Denklem B.27 ve Denklem B.28 ile temsil edilmiştir.

$$[C_{T,i}]_{n\,x\,1} - [C_{H,i}]_{n\,x\,1} = [C_{P,i}]_{n\,x\,1} = f_P([B_i]_{n\,x\,1}) \quad \text{(Denklem B.27)}$$

$$[C_{T,i}]_{n\,x\,1} = [C_{H,i}]_{n\,x\,1} + [C_{T,i}]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.28)}$$

Denklem B.28'in sağ tarafı Denklem B.10'da yerine koyulup düzenlenince Denklem B.31 elde edilir.

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1} = \sum_{i=1}^{n} \left( \left( C_{H,i} + C_{P,i} \right) \cdot [v_i]_{n\,x\,1} \cdot f_i(\lambda_i, t) \right) + [P_i(t)]_{n\,x\,1,P} \quad \text{(Denklem B.29)}$$

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1} = \sum_{i=1}^{n} \left( C_{H,i} \cdot [v_i]_{n\,x\,1} \cdot f_i(\lambda_i, t) + C_{P,i} \cdot [v_i]_{n\,x\,1} \cdot f_i(\lambda_i, t) \right) + [P_i(t)]_{n\,x\,1,P} \quad \text{(Denklem B.30)}$$

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1} = \sum_{i=1}^{n} \left( C_{H,i} \cdot [v_i]_{n\,x\,1} \cdot f_i(\lambda_i, t) \right) + \sum_{i=1}^{n} \left( C_{P,i} \cdot [v_i]_{n\,x\,1} \cdot f_i(\lambda_i, t) \right) + [P_i(t)]_{n\,x\,1,P} \quad \text{(Denklem B.31)}$$

Denklem B.1'in özel çözümü olan Denklem B.15'in sağ tarafı Denklem B.31 de yerine koyulup düzenlenince Denklem B.32 elde edilir.

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1} = \sum_{i=1}^{n} \left( [v_i]_{n\,x\,1} \cdot C_{H,i} \cdot f_i(\lambda_i, t) \right) + \sum_{i=1}^{n} \left( [v_i]_{n\,x\,1} \cdot C_{P,i} \cdot f_i(\lambda_i, t) \right) - inv([A]_{n\,x\,n}) \cdot [B_i]_{n\,x\,1}$$

(Denklem B.32)

$[v_i]_{n\,x\,1}$ ve $inv([A]_{n\,x\,n})$; sırasıyla Denklem B.33 ve Denklem B.34'te verilmektedir.

$$[v_i]_{n\,x\,1} = \begin{bmatrix} v_{1,i} \\ v_{2,i} \\ \vdots \\ v_{n-1,i} \\ v_{n,i} \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem B.33)}$$

$$inv([A]_{n\,x\,n}) = \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n-1} & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n-1} & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{n-1,1} & a_{n-1,2} & \cdots & a_{n-1,n-1} & a_{n-1,n} \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,n-1} & a_{n,n} \end{bmatrix}^{-1} \quad \text{(Denklem B.34)}$$

Denklem B.33 ve Denklem B.34'ün sağ taraflar, Denklem B.32'de yerlerine koyulup düzenlendiklerinde Denklem B.36,

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1} = \sum_{i=1}^{n}\left(\begin{bmatrix} v_{1,i} \\ v_{2,i} \\ \vdots \\ v_{n-1,i} \\ v_{n,i} \end{bmatrix} \cdot \underbrace{C_{H,i} \cdot f_i(\lambda_i, t)}_{S_{H,i}}\right) +$$

$$\sum_{i=1}^{n}\left(\begin{bmatrix} v_{1,i} \\ v_{2,i} \\ \vdots \\ v_{n-1,i} \\ v_{n,i} \end{bmatrix} \cdot \underbrace{C_{P,i} \cdot f_i(\lambda_i, t)}_{S_{P,i}}\right) - \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n-1} & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n-1} & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{n-1,1} & a_{n-1,2} & \cdots & a_{n-1,n-1} & a_{n-1,n} \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,n-1} & a_{n,n} \end{bmatrix}^{-1} \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.35)}$$

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1} = \sum_{i=1}^{n}\left(\begin{bmatrix} v_{1,i} \\ v_{2,i} \\ \vdots \\ v_{n-1,i} \\ v_{n,i} \end{bmatrix} \cdot S_{H,i}\right) +$$

$$\sum_{i=1}^{n}\left(\begin{bmatrix} v_{1,i} \\ v_{2,i} \\ \vdots \\ v_{n-1,i} \\ v_{n,i} \end{bmatrix} \cdot S_{P,i}\right) - \begin{bmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,n-1} & a_{1,n} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,n-1} & a_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{n-1,1} & a_{n-1,2} & \cdots & a_{n-1,n-1} & a_{n-1,n} \\ a_{n,1} & a_{n,2} & \cdots & a_{n,n-1} & a_{n,n} \end{bmatrix}^{-1} \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.36)}$$

Denklem B.36'deki toplam ifadelerinin açılmasıyla Denklem B.37 ve Denklem B.38 elde edilir.

$$\sum_{i=1}^{n}\left(\begin{bmatrix} v_{1,i} \\ v_{2,i} \\ \vdots \\ v_{n-1,i} \\ v_{n,i} \end{bmatrix} \cdot S_{H,i}\right) = \begin{bmatrix} v_{1,1} \\ v_{2,1} \\ \vdots \\ v_{n-1,1} \\ v_{n,1} \end{bmatrix} \cdot S_{H,1} + \begin{bmatrix} v_{1,2} \\ v_{2,2} \\ \vdots \\ v_{n-1,2} \\ v_{n,2} \end{bmatrix} \cdot S_{H,2} + \cdots + \begin{bmatrix} v_{1,n-1} \\ v_{2,n-1} \\ \vdots \\ v_{n-1,n-1} \\ v_{n,n-1} \end{bmatrix} \cdot S_{H,n-1} + \begin{bmatrix} v_{1,n} \\ v_{2,n} \\ \vdots \\ v_{n-1,n} \\ v_{n,n} \end{bmatrix} \cdot S_{H,n}$$

$$= \begin{bmatrix} v_{1,1} \cdot S_{H,1} + v_{2,1} \cdot S_{H,2} + \cdots + v_{1,n-1} \cdot S_{H,n-1} + v_{1,n} \cdot S_{H,n} \\ v_{2,1} \cdot S_{H,1} + v_{2,2} \cdot S_{H,2} + \cdots + v_{2,n-1} \cdot S_{H,n-1} + v_{2,n} \cdot S_{H,n} \\ \vdots \\ v_{n-1,1} \cdot S_{H,1} + v_{n-1,2} \cdot S_{H,2} + \cdots + v_{n-1,n-1} \cdot S_{H,n-1} + v_{n-1,n} \cdot S_{H,n} \\ v_{n,1} \cdot S_{H,1} + v_{n,2} \cdot S_{H,2} + \cdots + v_{n,n-1} \cdot S_{H,n} + v_{n,n} \cdot S_{H,n} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & \cdots & v_{1,n-1} & v_{1,n} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & \cdots & v_{2,n-1} & v_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ v_{n-1,1} & v_{n-1,2} & \cdots & v_{n-1,n-1} & v_{n-1,n} \\ v_{n,1} & v_{n,2} & \cdots & v_{n,n-1} & v_{n,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{H,1} \\ S_{H,2} \\ \vdots \\ S_{H,n-1} \\ S_{H,n} \end{bmatrix} \quad \text{(Denklem B.37)}$$

$$\sum_{i=1}^{n}\left(\begin{bmatrix} v_{1,i} \\ v_{2,i} \\ \vdots \\ v_{n-1,i} \\ v_{n,i} \end{bmatrix}\cdot S_{P,i}\right)=\begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & \cdots & v_{1,n-1} & v_{1,n} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & \cdots & v_{2,n-1} & v_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ v_{n-1,1} & v_{n-1,2} & \cdots & v_{n-1,n-1} & v_{n-1,n} \\ v_{n,1} & v_{n,2} & \cdots & v_{n,n-1} & v_{n,n} \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} S_{P,1} \\ S_{P,2} \\ \vdots \\ S_{P,n-1} \\ S_{P,n} \end{bmatrix}$$

(Denklem B.38)

Daha önceden de belirlenmiş olduğu gibi, Denklem B.37 ve Denklem B.38 deki matris, aslında Denklem B.1'deki matrisinin ($[A]_{n\,x\,n}$) özuzayına ($[E_\lambda]_{n\,x\,n}$) eşittir (Denklem B.39).

$$\begin{bmatrix} v_{1,1} & v_{1,2} & \cdots & v_{1,n-1} & v_{1,n} \\ v_{2,1} & v_{2,2} & \cdots & v_{2,n-1} & v_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ v_{n-1,1} & v_{n-1,2} & \cdots & v_{n-1,n-1} & v_{n-1,n} \\ v_{n,1} & v_{n,2} & \cdots & v_{n,n-1} & v_{n,n} \end{bmatrix}=[E_\lambda]_{n\,x\,n} \qquad \text{(Denklem B.39)}$$

$S_{H,i}$ ve $S_{P,i}$ terimlerine yakından bakıldığında

$$S_{P,i}=\underbrace{C_{P,i}}_{f_P([B_i]_{n\,x\,1})}\cdot f_i(\lambda_i,t)\Longrightarrow\begin{bmatrix} S_{H,1} \\ S_{H,2} \\ \vdots \\ S_{H,n-1} \\ S_{H,n} \end{bmatrix}=[S_{P,i}]_{n\,x\,1}=[C_{P,i}\cdot f_i(\lambda_i,t)]_{n\,x\,1}$$
$$=f_{SP}([B_i]_{n\,x\,1},[\lambda_i]_{n\,x\,1},t)$$

$$S_{H,i}=\underbrace{C_{H,i}}_{f_{H,i}(P_{i,0})}\cdot f_i(\lambda_i,t)\Longrightarrow\begin{bmatrix} S_{H,1} \\ S_{H,2} \\ \vdots \\ S_{H,n-1} \\ S_{H,n} \end{bmatrix}=[S_{H,i}]_{n\,x\,1}=[C_{H,i}\cdot f_i(\lambda_i,t)]_{n\,x\,1}$$
$$=f_{SH}\left([P_{0,i}]_{n\,x\,1},[\lambda_i]_{n\,x\,1},t\right)$$

$[S_{H,i}]_{n\,x\,1}$, $[S_{P,i}]_{n\,x\,1}$ vektör fonksiyonlarının yapısı daha net anlaşılır. Buna göre;$[S_{H,i}]_{n\,x\,1}$ başlangıç koşulları vektörünün ($[P_{0,i}]_{n\,x\,1}$), $[S_{P,i}]_{n\,x\,1}$ ise dış etkenler vektörünün ($[B_i]_{n\,x\,1}$) fonksiyonlarıdır. Denklem B.34'ün sol tarafı ve Denklem B.37, C.38 ve C.39'un sağ tarafları, Denklem B.36'da yerlerine koyulduklarında, Denklem B.40 elde edilmektedir.

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1}=[E_\lambda]_{n\,x\,n}\cdot[S_{H,i}]_{n\,x\,1}+[E_\lambda]_{n\,x\,n}\cdot[S_{P,i}]_{n\,x\,1}-inv([A]_{n\,x\,n})\cdot[B_i]_{n\,x\,1}$$

(Denklem B.40)

Bu denklemdeki çarpımların tümünün matris çarpımı olduğu unutulmamalıdır. vektör fonksiyonlarının açık halleri, Denklem B.40'da yerine koyulduklarında Denklem B.41 elde edilir.

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1} = [E_\lambda]_{n\,x\,n} \cdot \left[ \underbrace{C_{H,i}}_{f_{H,i}(P_{0,i})} \cdot f_i(\lambda_i, t) \right]_{n\,x\,1} + [E_\lambda]_{n\,x\,n} \cdot \left[ \underbrace{C_{P,i}}_{f_P([B_i]_{n\,x\,1})} \cdot f_i(\lambda_i, t) \right]_{n\,x\,1} - inv([A]_{n\,x\,n}) \cdot [B_i]_{n\,x\,1}$$

(Denklem B.41)

Denklem B.41, çözümünün ve vektörlerinin bir fonksiyonlarının toplamı olduğunu göstermekle birlikte, kullanım açısından Denklem B.2'deki biçim elde edilememiştir. Bu amaçla aşağıdaki anlatılan işlemler yapılarak Denklem B.2'deki biçim elde edilir.

- **Adım 1:** Özvektörlerden her birinin tüm elemanları, kendisi ile aynı indekse sahip olan sabiti ile çarpılır. (örneğin özdeğerine karşı gelen özvektörün el emanlarının tümü, sabiti ile çarpılır) ve elde edilen sütun vektörler indeks sırası ile yan yana dizilerek bir matris () elde edilir (Denklem B.42). Özvektörlere aynı işlem; sabitleri ile de uygulanarak matrisi elde edilir (Denklem B.43).

$$[E_\lambda C_H]_{n\,x\,n} = \begin{bmatrix} C_{H,1} \cdot v_{1,1} & C_{H,2} \cdot v_{1,2} & \cdots & C_{H,n-1} \cdot v_{1,n-1} & C_{H,n} \cdot v_{1,n} \\ C_{H,1} \cdot v_{2,1} & C_{H,2} \cdot v_{2,2} & \cdots & C_{H,n-1} \cdot v_{2,n-1} & C_{H,n} \cdot v_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_{H,1} \cdot v_{n-1,1} & C_{H,2} \cdot v_{n-1,2} & \cdots & C_{H,n-1} \cdot v_{n-1,n-1} & C_{H,n} \cdot v_{n-1,n} \\ C_{H,1} \cdot v_{n,1} & C_{H,2} \cdot v_{n,2} & \cdots & C_{H,n-1} \cdot v_{n,n-1} & C_{H,n} \cdot v_{n,n} \end{bmatrix}$$

(Denklem B.42)

$$[E_\lambda C_P]_{n\,x\,n} = \begin{bmatrix} C_{P,1} \cdot v_{1,1} & C_{P,2} \cdot v_{1,2} & \cdots & C_{P,n-1} \cdot v_{1,n-1} & C_{P,n} \cdot v_{1,n} \\ C_{P,1} \cdot v_{2,1} & C_{P,2} \cdot v_{2,2} & \cdots & C_{P,n-1} \cdot v_{2,n-1} & C_{P,n} \cdot v_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_{P,1} \cdot v_{n-1,1} & C_{P,2} \cdot v_{n-1,2} & \cdots & C_{P,n-1} \cdot v_{n-1,n-1} & C_{P,n} \cdot v_{n-1,n} \\ C_{P,1} \cdot v_{n,1} & C_{P,2} \cdot v_{n,2} & \cdots & C_{P,n-1} \cdot v_{n,n-1} & C_{P,n} \cdot v_{n,n} \end{bmatrix}$$

(Denklem B.43)

ve olduğuna göre; başlangıç koşulları vektörü ve dış etkenler vektörü bir küme olarak düşünüldüğünde yalnızca başlangıç koşullarının, matrisi ise yalnızca dış etkenlerin bir fonksiyonu olacaktır.

- **Adım 2:** Adım 1'de elde edilmiş olan matrisinin her sütunu sütün numarası ile aynı indeksteki sistem bileşeni için tanımlanmış olan başlangıç koşuluna () bölünerek matrisi elde edilir (Denklem B.44). Aynı işlem ve dış etkenler () ile yapılarak matrisi elde edilir (Denklem B.45).

$$\left[\frac{C_H}{P_0}E_\lambda\right]_{n\,x\,n}=\begin{bmatrix}\frac{C_{H,1}}{P_{0,1}}\cdot v_{1,1} & \frac{C_{H,2}}{P_{0,2}}\cdot v_{1,2} & \cdots & \frac{C_{H,n-1}}{P_{0,n-1}}\cdot v_{1,n-1} & \frac{C_{H,n}}{P_{0,n}}\cdot v_{1,n}\\ \frac{C_{H,1}}{P_{0,1}}\cdot v_{2,1} & \frac{C_{H,2}}{P_{0,2}}\cdot v_{2,2} & \cdots & \frac{C_{H,n-1}}{P_{0,,n-1}}\cdot v_{2,n-1} & \frac{C_{H,n}}{P_{0,n}}\cdot v_{2,n}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots\\ \frac{C_{H,1}}{P_{0,1}}\cdot v_{n-1,1} & \frac{C_{H,2}}{P_{0,2}}\cdot v_{n-1,2} & \cdots & \frac{C_{H,n-1}}{P_{0,n-1}}\cdot v_{n-1,n-1} & \frac{C_{H,n}}{P_{0,n}}\cdot v_{n-1,n}\\ \frac{C_{H,1}}{P_{0,1}}\cdot v_{n,1} & \frac{C_{H,2}}{P_{0,2}}\cdot v_{n,2} & \cdots & \frac{C_{H,n-1}}{P_{0,n-1}}\cdot v_{n,n-1} & \frac{C_{H,n}}{P_{0,n}}\cdot v_{n,n}\end{bmatrix}$$

(Denklem B.44)

$$\left[\frac{C_H}{P_0}E_\lambda\right]_{n\,x\,n}=\begin{bmatrix}\frac{C_{H,1}}{P_{0,1}}\cdot v_{1,1} & \frac{C_{H,2}}{P_{0,2}}\cdot v_{1,2} & \cdots & \frac{C_{H,n-1}}{P_{0,n-1}}\cdot v_{1,n-1} & \frac{C_{H,n}}{P_{0,n}}\cdot v_{1,n}\\ \frac{C_{H,1}}{P_{0,1}}\cdot v_{2,1} & \frac{C_{H,2}}{P_{0,2}}\cdot v_{2,2} & \cdots & \frac{C_{H,n-1}}{P_{0,,n-1}}\cdot v_{2,n-1} & \frac{C_{H,n}}{P_{0,n}}\cdot v_{2,n}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots\\ \frac{C_{H,1}}{P_{0,1}}\cdot v_{n-1,1} & \frac{C_{H,2}}{P_{0,2}}\cdot v_{n-1,2} & \cdots & \frac{C_{H,n-1}}{P_{0,n-1}}\cdot v_{n-1,n-1} & \frac{C_{H,n}}{P_{0,n}}\cdot v_{n-1,n}\\ \frac{C_{H,1}}{P_{0,1}}\cdot v_{n,1} & \frac{C_{H,2}}{P_{0,2}}\cdot v_{n,2} & \cdots & \frac{C_{H,n-1}}{P_{0,n-1}}\cdot v_{n,n-1} & \frac{C_{H,n}}{P_{0,n}}\cdot v_{n,n}\end{bmatrix}$$

(Denklem B.45)

Bu adımda elde edilen matrisler bağımsız değişkenin birer fonksiyonu değildir.

- **Adım 3:** matrisi oluşturulur (Denklem B.46).

$$[F_i(t)]_{n\,x\,n}=\begin{bmatrix}f_1(\lambda_1,t) & f_2(\lambda_2,t) & \cdots & f_{n-1}(\lambda_{n-1},t) & f_n(\lambda_n,t)\\ f_1(\lambda_1,t) & f_2(\lambda_2,t) & \cdots & f_{n-1}(\lambda_{n-1},t) & f_n(\lambda_n,t)\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots\\ f_1(\lambda_1,t) & f_2(\lambda_2,t) & \cdots & f_{n-1}(\lambda_{n-1},t) & f_n(\lambda_n,t)\\ f_1(\lambda_1,t) & f_2(\lambda_2,t) & \cdots & f_{n-1}(\lambda_{n-1},t) & f_n(\lambda_n,t)\end{bmatrix}$$

(Denklem B.46)

- **Adım 4:** Denklem B.1'in özümü $[P_i\,t]_{n\,x\,1}$; $[P_{0,i}]_{n\,x\,1}$, $[B_i]_{n\,x\,1}$, $[C_H/P_0\;E_\lambda]_{n\,x\,n}$ $[C_P/B\,E_\lambda]_{n\,x\,n}$ ve $[F_i\,t]_{n\,x\,n}$ kullanılarak yazılır (Denklem B.47)

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1}=\left(\left[\frac{C_H}{P_0}E_\lambda\right]_{n\,x\,n}\circ[F_i(t)]_{n\,x\,n}\right)\cdot[P_{0,i}]_{n\,x\,1}+$$

$$\left(\left[\frac{C_P}{B}E_\lambda\right]_{n\,x\,n}\circ[F_i(t)]_{n\,x\,n}\right)\cdot[B_i]_{n\,x\,1}-inv([A]_{n\,x\,n})\cdot[B_i]_{n\,x\,1}$$

(Denklem B.47)

Denklem B.47'deki  ifadesi, sağındaki ve solundaki matrislerin eleman elemana çarpımları anlamında bir operatördür ve ilgili çarpım işlemi "Hadamard çarpımı" olarak tanımlanmıştır.

Matris çarpımının matris toplamı ile dağılma özelliği nedeniyle; Denklem B.47, Denklem B.48 elde edilecek şekilde düzenlenebilir.

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1} = \left(\left[\frac{C_H}{P_0}E_\lambda\right]_{n\,x\,n} \circ [F_i(t)]_{n\,x\,n}\right) \cdot [P_{0,i}]_{n\,x\,1} + \left(\left(\left[\frac{C_P}{B}E_\lambda\right]_{n\,x\,n} \circ [F_i(t)]_{n\,x\,n}\right) - inv([A]_{n\,x\,n})\right) \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.48)}$$

ve  sırasıyla Denklem B.49 ve Denklem B.50'deki gibi tanımlanıp

$$f_{BAŞ}(t) = \left[\frac{C_H}{P_0}E_\lambda\right]_{n\,x\,n} \circ [F_i(t)]_{n\,x\,n} \quad \text{(Denklem B.49)}$$

$$f_{DIŞ}(t) = \left(\left[\frac{C_P}{B}E_\lambda\right]_{n\,x\,n} \circ [F_i(t)]_{n\,x\,n}\right) - inv([A]_{n\,x\,n}) \quad \text{(Denklem B.50)}$$

sağ tarafları Denklem B.48'de yerlerine koyulunca, Denklem B.51 elde edilir.

$$[P_i(t)]_{n\,x\,1} = f_{BAŞ}(t) \cdot [P_{0,i}]_{n\,x\,1} + f_{DIŞ}(t) \cdot [B_i]_{n\,x\,1} \quad \text{(Denklem B.51)}$$

Denklem B.51'nin; Denklem B.2 ile aynı olduğu görülmektedir.

**B.2 Fonksiyonlarının Elde Edilmesi**

fonksiyonları; özdeğerlere bağlıdır. Bu fonksiyonlar standart yüksek matematik kitaplarında aşağıdaki gibi verilemtedir:

- Gerçek ve tekrarlı (çok katlı) olmayan özdeğerler () için Denklem B.52 ile verilmektedir.

$$f_{RDE,i}(\lambda_i, t) = exp(\lambda_i \cdot t) \quad \text{(Denklem B.52)}$$

Bu durumda, eğer $n_1$ adet gerçek ve tekrarlı (çok katlı) olmayan özdeğer varsa, $n_1$ adet fonksiyonu olacaktır.

- Gerçek ve tekrarlı (çok katlı köke bağlı) özdeğerler () için,  tekrar indeksi olmak üzere tekrar sayısı () kadar  fonksiyonu (Denklem B.53) olacak ve bu fonksiyonu olacak ve bu fonksiyonlar toplanacaktır (Denklem B.54). $n_2$ tekrarlanan gerçek özdeğerlerin sayısıdır.

$$f_{RRE,j_k}(\lambda_{RR,j},t) = t^{k_j-1}\cdot exp(\lambda_{RR,j}\cdot t) \quad \text{(Denklem B.53)}$$

$$\begin{aligned}
f_{RRE,1}(\lambda_{RR,1},t) &= \left(\sum_{k_1=1}^{ks_1} t^{k_1-1}\right)\cdot exp(\lambda_{RR,1}\cdot t)\\
f_{RRE,2}(\lambda_{RR,2},t) &= \left(\sum_{k_2=1}^{ks_2} t^{k_2-1}\right)\cdot exp(\lambda_{RR,2}\cdot t)\\
&\vdots\\
f_{RRE,j}(\lambda_{RR,j},t) &= \left(\sum_{k_j=1}^{ks_j} t^{k_j-1}\right)\cdot exp(\lambda_{RR,j}\cdot t)\\
&\vdots\\
f_{RRE,n_2}(\lambda_{RR,n_2},t) &= \left(\sum_{k_{n_2}=1}^{ks_{n_2}} t^{k_{n_2}-1}\right)\cdot exp(\lambda_{RR,n_2}\cdot t)
\end{aligned} \quad \text{(Denklem B.54)}$$

- İki karmaşık eşlenik özdeğer olması ( ve ) durumunda ise, iki fonksiyon ( ve ) elde edilecektir. $n_3$ tekrarlanmayan karmaşık özdeğerlerin sayısıdır.

$$f_{CCP,1,m}(\alpha_m,\beta_m,t) = exp(\alpha_m\cdot t)\cdot cos(\beta_m\cdot t) - exp(\alpha_m\cdot t)\cdot sin(\beta_m\cdot t) \quad \text{(Denklem B.55)}$$

$$f_{CCP,2,m}(\alpha_m,\beta_m,t) = exp(\alpha_m\cdot t)\cdot cos(\beta_m\cdot t) + exp(\alpha_m\cdot t)\cdot sin(\beta_m\cdot t) \quad \text{(Denklem B.56)}$$

- İki karmaşık eşlenik tekrarlı özdeğer olması ( and ) durumunda ise, tekrar indeksi olmak üzere her biri tekrar sayısı () kadar fonksiyon içeren ve biçimleri (Denklem B.57 ve Denklem B.58'de verilen) iki fonksiyon grubu elde edilecek ve bu fonksiyonlar toplanacaktır (Denklem B.59 ve Denklem B.60). $n_4$ tekrarlanan eşlenik karmaşık özdeğer sayısıdır.

$$f_{RCCE,1,p}(\alpha_{R,p},\beta_{R,p},t) = t^{S_p-1}\cdot\Big(exp(\alpha_{R,p}\cdot t)\cdot cos(\beta_{R,p}\cdot t) - exp(\alpha_{R,p}\cdot t)\cdot sin(\beta_{R,p}\cdot t)\Big) \quad \text{(Denklem B.57)}$$

$$f_{RCCE,2,p}(\alpha_{R,p},\beta_{R,p},t) = t^{S_p-1}\cdot\Big(exp(\alpha_{R,p}\cdot t)\cdot cos(\beta_{R,p}\cdot t) + exp(\alpha_{R,p}\cdot t)\cdot sin(\beta_{R,p}\cdot t)\Big) \quad \text{(Denklem B.58)}$$

$$f_{RCCE,1,1}(\alpha_{R,1},\beta_{R,1},t)=\left(\sum_{s_1=1}^{kcc_1}t^{s_1-1}\right)\cdot\left(exp(\alpha_{R,1}\cdot t)\cdot cos(\beta_{R,1}\cdot t)-exp(\alpha_{R,1}\cdot t)\cdot sin(\beta_{R,1}\cdot t)\right)$$

$$f_{RCCE,1,2}(\alpha_{R,2},\beta_{R,2},t)=\left(\sum_{s_2=1}^{kcc_2}t^{s_2-1}\right)\cdot\left(exp(\alpha_{R,2}\cdot t)\cdot cos(\beta_{R,2}\cdot t)-exp(\alpha_{R,2}\cdot t)\cdot sin(\beta_{R,2}\cdot t)\right)$$

$$\vdots$$

$$f_{RCCE,1,p}(\alpha_{R,p},\beta_{R,p},t)=\left(\sum_{s_p=1}^{kcc_s}t^{s_p-1}\right)\cdot\left(exp(\alpha_{R,p}\cdot t)\cdot cos(\beta_{R,p}\cdot t)-exp(\alpha_{R,p}\cdot t)\cdot sin(\beta_{R,p}\cdot t)\right)$$

$$\vdots$$

$$f_{RCCE,1,n_4}(\alpha_{R,n_4},\beta_{R,n_4},t)=\left(\sum_{s_{n_4}=1}^{kcc_{n_4}}t^{s_{n_4}-1}\right)\cdot\left(exp(\alpha_{R,n_4}\cdot t)\cdot cos(\beta_{R,n_4}\cdot t)-exp(\alpha_{R,n_4}\cdot t)\cdot sin(\beta_{R,n_4}\cdot t)\right)$$

(Denklem B.59)

$$f_{RCCE,1,1}(\alpha_{R,1},\beta_{R,1},t)=\left(\sum_{s_1=1}^{kcc_1}t^{s_1-1}\right)\cdot\left(exp(\alpha_{R,1}\cdot t)\cdot cos(\beta_{R,1}\cdot t)+exp(\alpha_{R,1}\cdot t)\cdot sin(\beta_{R,1}\cdot t)\right)$$

$$f_{RCCE,1,2}(\alpha_{R,2},\beta_{R,2},t)=\left(\sum_{s_2=1}^{kcc_2}t^{s_2-1}\right)\cdot\left(exp(\alpha_{R,2}\cdot t)\cdot cos(\beta_{R,2}\cdot t)+exp(\alpha_{R,2}\cdot t)\cdot sin(\beta_{R,2}\cdot t)\right)$$

$$\vdots$$

$$f_{RCCE,1,p}(\alpha_{R,p},\beta_{R,p},t)=\left(\sum_{s_p=1}^{kcc_s}t^{s_p-1}\right)\cdot\left(exp(\alpha_{R,p}\cdot t)\cdot cos(\beta_{R,p}\cdot t)+exp(\alpha_{R,p}\cdot t)\cdot sin(\beta_{R,p}\cdot t)\right)$$

$$\vdots$$

$$f_{RCCE,1,n_4}(\alpha_{R,n_4},\beta_{R,n_4},t)=\left(\sum_{s_{n_4}=1}^{kcc_{n_4}}t^{s_{n_4}-1}\right)\cdot\left(exp(\alpha_{R,n_4}\cdot t)\cdot cos(\beta_{R,n_4}\cdot t)+exp(\alpha_{R,n_4}\cdot t)\cdot sin(\beta_{R,n_4}\cdot t)\right)$$

(Denklem B.60)

Tüm özdeğerler dikkate alındıklarında Denklem B.61 geçerlidir.

$$n=n_1+\sum_{j=1}^{n_2}ks_j+(2\cdot n_3)+2\cdot\sum_{p=1}^{n_4}kcc_p \qquad \text{(Denklem B.61)}$$

## Yazar Hakkında / About Author

**Prof. Dr. Ali ERTÜRK | İstanbul Üniversitesi |**
**erturkali[at]istanbul.edu.tr |ORCID: 0000-0002-3532-2961**

Ali Ertürk, 2000 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Programı'ndan mezun olmuştur. 2002 yılında aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Programı'ndan yüksek lisansını tamamlamıştır. 2005 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Programını bitirerek ikinci lisans derecesini almıştır. 2008 yılında Klaipeda Üniversitesi'nde Ekoloji ve Çevre Bilimleri dalında yaşam bilimleri ana grubu altında doktorasını tamamlamıştır. 2012 yılında Çevre Bilimleri ve Mühendisliği'nden Doçent unvanını almıştır. 2022 yılında Anadolu Üniversitesi İktisat Fakültesi Uzaktan Öğrenim İktisat programından mezun olarak üçüncü lisans derecesini almıştır. 2001-2009 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi, 2009 – 2014 yılları arasında aynı bölümde öğretim üyesi, 2014 yılından günümüze kadar ise İstanbul Üniversitesi Su Ürünleri ve Su Bilimleri fakültelerinde öğretim üyesi olarak görev yapmıştır. Çalışma alanları su kirlenmesi kontrolü, havza yönetimi, ekosistem modelleme ve teorik ekolojidir.

**Prof. Dr. Ali ERTÜRK | İstanbul University |**
**erturkali[at]istanbul.edu.tr | ORCID: 0000-0002-3532-2961**

Ali Ertürk graduated from Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, Environmental Engineering Program in 2000. In 2002, he received his master's degree from the Institute of Science, Environmental Engineering Program of the same university. In 2005, he graduated from Istanbul Technical University, Faculty of Arts and Sciences, Chemistry Program and received his second bachelor's degree. In 2008, he completed his Ph.D. in Ecology and Environmental Sciences at the University of Klaipeda under the main group of life sciences. In 2012, he received the title of Associate Professor in Environmental Sciences and Engineering. In 2022, he graduated from Anadolu University, Faculty of Economics, Distance Learning Economics program and received his third bachelor's degree. He worked as a research assistant at Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering, Department of Environmental Engineering between 2001-2009, as a faculty member at the same department between 2009-2014, and as a faculty member at Istanbul University, Faculty of Fisheries and Aquatic Sciences since 2014. His research interests include water pollution control, watershed management, ecosystem modeling, and theoretical ecology.

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN TÜRKİYE ORMAN EKOSİSTEMLERİNE ETKİSİ

# THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON TÜRKİYE'S FOREST ECOSYSTEMS

*Bekir KARACABEY*

 DOI: 10.53478/TUBA.978-625-8352-56-6.ch16

# İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN TÜRKİYE ORMAN EKOSİSTEMLERİNE ETKİSİ

***Bekir KARACABEY***
*Genel Müdür*
*Orman Genel Müdürlüğü*

**Özet**

Su, tüm canlılar ve ekosistemler için hayati öneme sahip olup, "temiz ve ulaşılabilir su" insanlığın, medeniyetlerin ve tüm yaşamın esasını oluşturmaktadır. Aynı durum ormanlar ve orman dışı ağaçlık alanlar için de geçerlidir. Ormanların oluşabilmesi, ağaçların ve her türlü bitki ve canlının büyüyüp hayatiyetlerini devam ettirebilmesi, orman ekosistemlerinin sürdürülebilirliği yeterli ve düzenli su ile mümkün olabilmektedir. Tüm insanlık için en temel referans ve evrensel mesaj olan Kuran-ı Kerim'de yer alan Hac Suresi 63. Ayetinde "*Görmedin mi Allah'ın gökten indirdiği su ile yeryüzü (nasıl) yemyeşil oluyor? Gerçekten Allah çok lütufkârdır, her şeyden haberdardır*" buyurulmaktadır. İklim değişikliği nedeniyle yağış düzenlerinde meydana gelen değişimler ormanları doğrudan etkilemektedir. Yağış azlığı ve kuraklık ormanların sağlığı, böcek epidemisi, orman yangınları gibi birçok etkiye neden olmaktadır. Bu etkilerin bir sonucu olarak orman ağaçlarının karışımında meydana gelen dönüşümler ile değişen ekolojik ortamlara uyumlu ve dirençli bitki türleri gerekmektedir. Suyun ormanlar üzerindeki etkisi kadar olmasa da ormanların; su yönetimi, evsel, tarımsal, endüstriyel ve ekolojik ihtiyaçlar için ihtiyaç duyulan suyun karşılanması, suyun miktarı, kalitesi ve temizlenmesi, yüzey ve yeraltı suyu akışları, kuraklığın etkilerinin azaltılması, heyelan, sel ve taşkınların önlenmesi ve etkilerinin azaltılması dahil olmak üzere birçok konuda su üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bu durum iki taraflı bir yönetimi zaruri kılmakta, "ormanlar ve ağaçlar için su - su için ormanlar, ağaçlar ve ekosistemler" yaklaşımının hayata geçirilmesi gerekmektedir. Hattı zatında bu yaklaşım, 2015 yılında Türkiye dahil tüm dünya ülkeleri tarafından kabul edilen "2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri" ve 2017 yılında kabul edilen 2017-2030 yıllarını kapsayacak BM Ormancılık Stratejisi ve 6 Küresel Orman Hedefi'nde şekil bulmaktadır.

***Anahtar Kelimeler***
*İklim değişikliği, Orman ekosistemleri, Kuraklık, Restorasyon, Sürdürülebilir kalkınma*

# THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON TÜRKİYE'S FOREST ECOSYSTEMS

**Abstract**

Water is vital for all living things and ecosystems, and "clean and accessible water" constitutes the basis of humanity, civilizations, and all life. The same is true for forests and the trees outside of forests. The formation of forests, the growth of trees and all kinds of plants and living things, and the sustainability of forest ecosystems are possible only with sufficient and regular water. In the 63rd verse of Surah Hajj in the Qur'an, which is an essential reference and message for all humanity, "Did you not see how the earth becomes green with the water that Allah has sent down from the sky? Indeed, Allah is very gracious, aware of everything." Changes and decreases in precipitation patterns due to climate change directly affect forests. Lack of precipitation and drought cause many effects, such as the health problems of forests and trees, insect epidemics, and forest fires. In addition, there are changes in the composition of forest trees, and species that are compatible and resistant to changing environmental conditions are required. The effect of water on forests is apparent and evident. On the other hand, forests have a significant and vital impact on water. Forests are effective in many aspects, including meeting the water needed for domestic, agricultural, industrial and ecological needs, the amount, quality and cleaning of water, surface and groundwater flows, reducing the effects of drought, preventing landslides, floods and overflows and reducing their effects. This situation necessitates a two-sided approach. The approach of "water for forests and trees" and "forests, trees and ecosystems for water" must be vital. This approach takes shape in the "2030 Sustainable Development Goals" accepted by all countries of the world, including Turkey, in 2015, and the "UN Forestry Strategy and 6 Global Forest Goals" adopted in 2017.

**Keywords**

*Climate change, Forest ecosystems, Drought, Restoration, Sustainable development*

## 1. Giriş

Dünya'nın kara yüzeyinin yaklaşık %30'unu kaplayan ormanlar büyüdükçe, ağaçlar havada bulunan karbonu odun materyali olarak, bitki maddesi şeklinde ve toprak altında depolar. Ormanlar olmasaydı, bu karbonun çoğu, iklim değişikliğine neden olan en önemli sera gazı olan karbondioksit ($CO_2$) şeklinde atmosferde kalacaktı.

2000'li yıllardan bu yana ormanların her yıl atmosferden ortalama 2 milyar ton karbon eksiltti-ği tahmin edilmektedir. Ormanların "karbon yutağı işlevi", başta fosil yakıtların yakılmasından kaynaklanan $CO_2$ oranını azaltarak iklim değişikliğinin etkilerini hafifletmektedir. Bu nedenle "sürdürülebilir orman yönetimi" iklim değişikliği ile mücadelede en önemli stratejilerden birisi olarak ele alınmaktadır. Sağlıklı ormanlar dışında kalan yerlerde yaşayamayan bitki ve hayvanlar için orman, temiz sudan habitatlara kadar bir dizi hayati fayda sağlamaktadır (Massachusetts Institute of Technology, 2021).

Sürdürülebilir orman yönetimi altındaki ormanlar, başta su, enerji ve odun dışı orman ürünleri olmak üzere sağladığı ürün ve hizmetler ile, kırsal kesimin desteklenmesi, ahşap temelli sektörler iklim değişikliği için hayati öneme sahiptir. Sürdürülebilir şekilde yönetilen ormanlar ve orman ürünleri önemli bir yutak alanı oluşturmakta iken, başta orman yangınları olmak üzere çeşitli nedenlerle meydana gelen ormansızlaşma ve ormanların tahribi önemli bir emisyon kaynağı olarak ortaya çıkmaktadır.

Diğer taraftan Türkiye'nin de içinde yer aldığı kurak ve yarı kurak alanlarda ormanların su döngüsündeki rolü son derece hassas bir konu olarak ortaya çıkmaktadır. Ormanlar açıkça kritik su tüketicileridir ve buna bağlı olarak tarım ve otlatma gibi diğer arazi kullanım sistemleri için su mevcudiyetini azaltır. Öte yandan, ağaçlar ve ormanlar, gölgeleme etkileri, gelişmiş sızma, iyileştirilmiş su kalitesi ve toprak bozulması ve erozyona karşı koruma gibi temel ekosistem hizmetlerini sağlamaktadır. Kurak ve yarı kurak alanlarda yürütülecek ormancılık faaliyetleri, yapılacak ağaçlandırma çalışmaları ormanların ve ağaçların su döngüsü üzerindeki rolünü dikkate alarak planlanmalı ve uygulanmalıdır.

Ülkemizin de içerisinde yer aldığı Akdeniz Havzası, küresel iklim değişikliğine karşı yerkürenin en hassas bölgelerinden birisidir. Akdeniz Havzası'nda gerçekleşecek 2°C'lik bir sıcaklık artışı, beklenmeyen hava olayları, sıcak hava dalgaları, orman yangınlarının sayısında ve etkisinde artış, kuraklık ve bunlar dolayısıyla biyolojik çeşitlilik kaybı, turizm gelirlerinde azalma ve tarımsal verim kaybı olarak etkilerini hissettirecektir. Akdeniz'de beklenen bu sıcaklık artışları doğal olarak diğer bölgelerde de görülebilecektir. Yapılan bilimsel tetkiklere göre hâlihazırda Karadeniz'in sıcaklığının 2°C arttığı ifade edilmektedir (Ağırbaş, 2022).

2011 yılında yayımlanan İklim Değişikliği Ulusal Eylem Planı (İDEP)'na göre Türkiye'de yıllık ortalama sıcaklığın gelecek yıllarda 2,5°- 4°C artacağı, artışın Ege ve Doğu Anadolu Bölgeleri'nde 4°C'yi, iç bölgelerinde ise 5˚C'yi bulacağı öngörülmüş olup Türkiye'nin yakın gelecekte daha sıcak, daha kurak ve yağışlar açısından daha belirsiz bir iklim yapısına sahip olacağı ve özellikle su kaynaklarının azalması, orman yangınları, kuraklık ve çölleşme, bunlara bağlı ekolojik bozulmalar gibi olumsuz etkilerden önemli ölçüde etkileneceği ifade edilmiştir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2012).

İklim değişikliğinin etkilerinin azaltılması ve ortaya çıkan yeni şartlara uyum yönünden bakıldığında ormancılık açısından yapılabilecekler özetle aşağıdaki gibi sıralanabilecektir:

Mevcut ormanların en iyi şekilde korunması ve durumlarının iyileştirilmesi,

- Kapalılığı düşük veya çeşitli nedenlerle bozulmuş ormanların restore edilmesi,
- Ekosistem hizmetleri dahil olmak üzere ormanlar ve orman dışındaki ağaçlar tarafından sunulan ürün ve hizmetlerin üretiminin ve insanlığın/tüm canlıların istifadesine sunulmasının artırılması,
- Mevcut ormanlar veya orman sayılan alanlar dışındaki alanlarda yapılacak ağaçlandırmalar yoluyla orman varlığının artırılması,
- Başta kırsal kesimdekiler olmak üzere yaşamları bir şekilde ormana bağımlı insanların hayat şartlarının iyileştirilmesi, ormanlar hakkındaki farkındalığın ve yerel/ulusal/küresel işbirliğinin artırılması.

## 2. Ormanlar ve İklim Değişikliği Konusundaki Uluslararası Düzenlemelerden Örnekler

2017 yılında kabul edilen "Birleşmiş Milletler Ormanlar Stratejik Planı-BMOSP" ile belirlenen 6 Küresel Ormancılık Hedefi'nde şekil bulmuştur ve bu hedefler 2015 yılında kabul edilen "2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri" ile uyumlu şekilde formüle edilmiştir (GÖNDER, 2017).

Birleşmiş Milletlerin ormancılık konusundaki ilk stratejik planı özelliğini taşıyan BMOSP, 20 Ocak 2017 tarihinde Birleşmiş Milletler Orman Forumu (UNFF) tarafından kabul edilmiştir. BMOSP, dünya genelindeki tüm ormanların ve ormanlar dışında bulunan ağaçların sürdürülebilir yönetimi, ormansızlaşma ve ormanların bozulması ile mücadele konusunda genel bir çerçeve çizmektedir.

BMOSP ile belirlenen 6 Küresel Orman Hedefi aşağıdaki gibidir.

**Küresel Orman Hedefi 1:** Koruma, restorasyon, ağaçlandırma ve yeniden ağaçlandırmalar dahil olmak üzere, sürdürülebilir orman yönetimi yolu ile, dünya genelindeki orman kaybını tersine çevirmek, orman bozulmasını önlemeye yönelik çabaları arttırmak ve iklim değişikliğine matuf küresel girişimleri desteklemek.

1 No'lu Küresel Orman Hedefinin alt hedefleri şunlardır:

- Orman alanının, dünya genelinde %3 oranında artırılması
- Dünyanın orman karbon stoklarının korunması veya geliştirilmesi
- 2020'ye kadar, her orman türünde sürdürülebilir yönetimin uygulanmasının teşvik edilmesi, ormansızlaşmanın durdurulması, bozulmuş ormanların rehabilite edilmesi, küresel olarak ağaçlandırma ve yeniden ormanlaştırma faaliyetlerinin önemli ölçüde arttırılması
- Her türlü ormanın doğal afetlere ve iklim değişikliğinin etkilerine karşı esnekliği ve uyum kapasitesinin dünya çapında önemli ölçüde güçlendirilmesi

Hedef 1 ve bunun alt hedefleri, diğerlerinin yanı sıra, Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinin 6.6, 12.2, 13.1, 13.3, 14.2, 15.1, 15.2, 15.3, 15.4 ve 15.8 No'lu hedeflerini, aynı şekilde Aichi Biyolojik Çeşitlilik Hedeflerinin 5, 7, 9, 11, 14 ve 15 No'lu hedeflerini desteklemektedir.

**Küresel Orman Hedefi 2:** Ormana bağımlı insanların geçim koşullarını iyileştirmek de dâhil olmak üzere, orman temelli ekonomik, sosyal ve çevresel faydaların arttırılması.

2 No'lu Küresel Orman Hedefinin alt hedefleri şunlardır:

- Tüm ormana bağımlı insanlar için aşırı yoksulluğun ortadan kaldırılması,
- Küçük ölçekli orman işletmelerinin, özellikle de gelişmekte olan ülkelerdeki uygun fiyatlı krediler dâhil olmak üzere finansal hizmetlere erişimini ve bunların değer zincirlerine ve pazarlara entegrasyonunun arttırılması,
- Ormanların ve ağaçların gıda güvenliğine olan katkısının önemli ölçüde arttırılması,
- Ormancılık endüstrisinin, diğer orman kökenli işletmelerin ve orman ekosistem hizmetlerinin sosyal, ekonomik ve çevresel kalkınmaya katkılarının arttırılması,
- İlgili sözleşmeler, devam eden çalışmalar da dikkate alınarak her tür ormanın; biyolojik çeşitliliğin korunması ve iklim değişikliğinin hafifletilmesi ve adaptasyonu konusundaki katkılarının arttırılması.

Hedef 2 ve bunun alt hedefleri, diğerlerinin yanı sıra 1.1, 1.4, 2.4, 4.4, 5.a, 6.6, 8.3, 9.3, 12.2, 12.5, 15.6 ve 15.c No'lu Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri, aynı şekilde Aichi Biyoçeşitlilik Hedeflerinin 4, 14 ve 18 No'lu hedeflerini desteklemekte ve katkı vermektedir.

**Küresel Orman Hedefi 3:** Dünyadaki korunan orman alanlarını, sürdürülebilir olarak yönetilen diğer orman alanlarını ve sürdürülebilir olarak yönetilen ormanlardan elde edilen orman ürünlerinin oranını belirgin şekilde arttırmak.

3 No'lu Küresel Orman Hedefinin alt hedefleri şunlardır:

- Dünya çapında korunan alanlar olarak veya diğer etkili alan temelli koruma önlemleri ile korunan orman alanları şeklinde belirlenmiş alanların önemli ölçüde artırılması,
- Uzun süreli orman amenajman planları ile yönetilen orman alanlarının önemli ölçüde arttırılması,
- Sürdürülebilir şekilde yönetilen ormanlardan elde edilen/hasat edilen/üretilen orman ürünlerinin oranının belirgin şekilde arttırılması.

Hedef 3 ve bunun alt hedefleri, diğerlerinin yanı sıra 7.2, 12.2, 12.6, 12.7, 14.2, 14.5, 15.2 ve 15.4 No'lu Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini ve 7, 11, 12 ve 16 No'lu Aichi Biyoçeşitlilik Hedeflerini desteklemekte ve katkı vermektedir.

**Küresel Orman Hedefi 4:** Sürdürülebilir orman yönetiminin uygulanması için, tüm kaynaklardan sağlanacak yeni ve ilave kaynakların arttırılması, bilimsel ve teknik işbirliği ve ortaklıkların güçlendirilmesi.

4 No'lu Küresel Orman Hedefinin alt hedefleri şunlardır:

- Sürdürülebilir orman yönetimini finanse etmek için tüm kaynaklardan ve her türden önemli kaynakların harekete geçirilmesi ve gelişmekte olan ülkelere, koruma ve yeniden ağaçlandırma da dahil olmak üzere bu yönetimi ilerletmek için yeterli teşvikler sağlanması,
- Kamu (ulusal, ikili, çok taraflı, çok ortaklı), özel ve gönüllü katkılar dahil, ormanla ilgili tüm kaynakların arttırılması,
- Orman sektöründe bilim, teknoloji ve inovasyon üzerine Kuzey-Güney, Güney-Güney, Kuzey-Kuzey ve üçlü iş birliği ve kamu-özel ortaklıklarının önemli ölçüde arttırılması ve güçlendirilmesi,
- Orman finansmanı stratejilerini geliştirmiş, uygulamakta olan ve tüm kaynaklardan ormancılıkla ilgili finansmana erişimi olan ülkelerin sayısının artırılması,
- Ormancılıkla ilgili bilgilerin toplanması, bulunması ve erişilebilirliğinin, çok disiplinli bilimsel değerlendirmeler yolu da dahil olmak üzere, çeşitli yöntemlerle geliştirilmesi.

Hedef 4 ve alt hedefleri, diğerlerinin yanı sıra 12.a, 15.7, 15.a, 15.b, 17.1, 17.2, 17.3, 17.6, 17.7, 17.16, 17.17, 17.18 ve 17.19 No'lu Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini ve ayrıca 19 No'lu Aichi Biyolojik Çeşitlilik Hedefini desteklemektedir.

**Küresel Orman Hedefi 5:** Birleşmiş Milletler (BM) Orman Enstrümanı (Birleşmiş Milletler Orman Sözleşmesi) da dahil olmak üzere sürdürülebilir orman yönetimini uygulamak için yönetim çerçevelerini teşvik etmek ve ormanların 2030 Gündemine katkısını artırmak.

5 No'lu Küresel Orman Hedefinin alt hedefleri şunlardır:

- Ormanları kendi ulusal sürdürülebilir kalkınma planlarına ve/veya yoksulluğu azaltma stratejilerine entegre eden ülkelerin sayısının arttırılması,
- Orman kanunlarının uygulanması ve yönetilmesinin, ulusal ve uluslar üstü orman otoritelerinin önemli ölçüde güçlendirilmesi de dahil olmak üzere çeşitli metotlarla arttırılması ve yasadışı kereste ve bununla ilişkili ticaretin, dünya çapında önemli ölçüde azaltılması,
- Ormancılıkla ilgili ulusal ve yerel politika ve programların, ilgili bakanlıklar, kurumlar ve otoriteler arasında ve diğer ulusal mevzuat ile uyumlu, koordineli ve birbirini tamamlayıcı nitelikte olması ve "Birleşmiş Milletler Yerli Halklar Hakları Bildirisi"ni tamamen tanıyor olması,
- Ormanla ilgili konuların ve orman sektörünün, arazi kullanım planlaması ve geliştirilmesi karar alma süreçlerine tam olarak entegre edilmesi.

5 No'lu Küresel Orman Hedefi, diğer katkılarının yanında, 1.4, 2.4, 5.a, 15.c, 15.9, 16.3, 16.5, 16.6, 16.7, 16.10 ve 17.14 No'lu Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerini, aynı şekilde 2 ve 3 No'lu Aichi Biyoçeşitlilik Hedeflerini desteklemekte ve katkı yapmaktadır.

**Küresel Orman Hedefi 6:** BM sistemi içinde ve Ormancılık İşbirliği Ortaklığına üye organizasyonlar üzerinden, aynı şekilde ormancılıkla ilgili sektörler ve ilgili ortaklar da dahil olmak üzere, her seviyede ormanla ilgili konularda işbirliği, koordinasyon, uyum ve sinerjiyi arttırmak.

6 No'lu Küresel Orman Hedefinin alt hedefleri şunlardır:

- BM sistemindeki ormanla ilgili programların birbirleri ile tutarlı ve birbirlerini tamamlayıcı olmaları ve uygun olanların Küresel Orman Hedeflerine entegre edilmesi,
- Ormancılık İşbirliği Ortaklığı ve üye kurumlar/kuruluşların ormancılıkla ilgili programlarının birbirleri ile uyumlu ve birbirlerini tamamlayıcı olması ve ormanlar ve orman sektörü olarak beraberce 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Gündemine çoklu katkı verir hale gelmesi,

- Sürdürülebilir orman yönetimini desteklemek, ormansızlaşma ve orman tahribatını/bozulmasını durdurmak amacıyla sektörler arası koordinasyon ve işbirliğinin her seviyede güçlü şekilde arttırılması,
- Sürdürülebilir Orman Yönetimi kavramının (konseptinin) daha geniş ve ortak şekilde anlaşılmasının ve kabul edilmesinin sağlanması ve bununla ilgili göstergelerin belirlenmesi,
- Büyük grupların ve diğer ilgili paydaşların BMOSP'nı uygulanmasına girmesi, katılımı ve Birleşmiş Milletler Orman Forumu oturumları dahil olmak üzere çalışmalara iştiraklerinin desteklenmesi.

6 No'lu Küresel Orman Hedefi, diğerlerinin yanında 17.14 No'lu Sürdürülebilir Kalkınma Hedefini desteklemektedir.

BM Küresel Orman Hedeflerinin yanında 2015 yılında kabul edilen Paris İklim Anlaşması da ormancılıkla ilgili birçok hususu içermektedir. Ülkemizin Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (BMİDÇS) kapsamında 2015 yılında kabul edilen "Paris Anlaşması-PA'na katılımı 06.10.2021 tarih ve 7335 Sayılı Kanun ile kabul edilmiş, ardından 07.10.2021 tarih ve 31621 (Mükerrer) Sayılı Resmî Gazetede yayımlanan Cumhurbaşkanlığı Kararı ile yürürlüğe girmiştir. Bu haliyle "Paris İklim Anlaşması" ülkemiz iç hukukunun da bir parçası olma vasfını taşımaktadır.

Anlaşma, sürdürülebilir kalkınma ve yoksulluğun ortadan kaldırılması bağlamında BMİDÇS'nin uygulamasını geliştirmeyi hedeflemektedir. İklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı uyum kabiliyetinin ve direncin arttırılması, düşük sera gazı emisyonlu kalkınmanın temin edilmesi ve düşük emisyonlu ve iklim dirençli kalkınma için uygun finansal destek verilmesi ve bunlar gerçekleştirilirken gıda üretiminin zarar görmemesi PA'nın öncelikli hedeflerindendir.

Bu çerçevede PA ormancılıkla ilgili birçok hüküm içermekte ve ormancılıkla ilgili projelerin uygun mekanizmalarla desteklenmesini öngörmektedir. PA'nın 5/1 Maddesi: "Taraflar, uygun olan şekilde, ormanlar da dâhil olmak üzere sera gazı yutak ve rezervlerini korumak ve güçlendirmek için harekete geçmelidir." hükmünü içerirken 5/2 Maddesi ise: "ormansızlaşmadan ve ormanların bozulmasından kaynaklanan emisyonların azaltılmasına, korumanın rolüne, ormanların sürdürülebilir yönetimine ve orman karbon stoklarının güçlendirilmesine yönelik teşviklere" vurgu yapmaktadır.

PA'nın 8/1 Maddesi "aşırı hava olaylarından kaynaklanan kayıp ve zararların riskinin azaltılması", 8/4 Maddesi ise aşırı hava olaylarına karşı alınabilecek "erken uyarı sistemleri, acil durumlara hazırlık, kapsamlı risk yönetimi, toplulukların, geçim kaynaklarının ve ekosistemlerin dirençliliği" gibi tedbirleri açıklamaktadır. 9/1 Maddesi ise bu kapsamda uygulanacak projelere sağlanacak "finans kaynağını" tanımlamaktadır.

## 3. İklim Değişikliğinin Ormanlar Üzerindeki Beklenen Etkileri

İklim değişikliğinin ormanlar ve ormancılık sektörü üzerindeki en önemli potansiyel etkileri maddeler biçiminde şöyle özetlenebilir:

1. Ağaç türü değişimleri,
2. Ağaç türlerine göre ormanlarda görülecek yapı, servet, artım, büyüme değişiklikleri,
3. Tür değişimleriyle birlikte karbon stok düzeyindeki değişiklikler,
4. Ormanların konumlarında meydana gelebilecek değişiklikler,
5. Sıcaklık artarken rutubetin azalması durumunda, ormanların büyüme kapasitesinde görülecek azalmalar,
6. İklim değişikliği sonucunda vejetasyon döneminin uzaması sonucunda bitkisel kütle artımında görülebilecek olumlu gelişmeler,
7. Yangın risklerinin ve potansiyel yangın risk alanlarının değişimi,
8. Topraklarda görülebilecek kimyasal değişiklikler,
9. Böcek popülasyonundaki artış ve türlerin değişimi,
10. Ağaçların dirençlerindeki değişiklikler.

## 4. Orman Genel Müdürlüğünce Yürütülen Faaliyetler

Türkiye'de ormanlar, devlet adına Orman Genel Müdürlüğü (OGM) tarafından yönetilmekte olup OGM bu yetkilerini 6831 Sayılı Orman Kanunu (Orman Kanunu, 2022) ve Bakanlıklara Bağlı, İlgili, İlişkili Kurum ve Kuruluşlar İle Diğer Kurum ve Kuruluşların Teşkilatı Hakkında 4 Sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi'nden almaktadır.

4 Sayılı Cumhurbaşkanlığı Kararnamesi, OGM'yi diğer hususların yanında, "Orman kaynaklarını; ekolojik, ekonomik ve sosyo-kültürel faydalarını dikkate alarak, bitki ve hayvan varlığı ile birlikte, ekosistem bütünlüğü içinde idare etmek, katılımcı ve çok amaçlı şekilde planlamak, usulsüz müdahalelere, tabii afetlere, yangınlara karşı korumak, muhtelif zararlılar ile mücadele etmek ve ettirmek, ormancılık karantina hizmetlerini yürütmek, geliştirmek, orman alanlarını ve ormanlara ilişkin hizmetleri artırmak, ormanları imar ve ıslah etmek, silvikültürel bakımını ve gençleştirilmesini sağlamak" ile yükümlü kılmaktadır. 2019-2023 yıllarını kapsayan OGM Stratejik Planı da benzer hedefleri içermekte olup, iklim değişikliği dahil günümüz ve geleceğin temel problemlerine çözüm arayan hedefler net şekilde yer almıştır (Orman Genel Müdürlüğü, 2019).

Bu çerçevede OGM tarafından yürütülen faaliyetlerin bir kısmı aşağıda sıralanmıştır.

1. Kuraklığa ve diğer ekstrem iklim koşullarına dayanıklı orijin denemeleri ve bu orijinlerin ağaçlandırma ve rehabilitasyon çalışmalarında kullanılması en önemli uyum çalışması olarak öne çıkmaktadır.

2. OGM-Fransa Orman Servisi (ONF) iş birliği kapsamında 2022 yılında "Ormancılıkta İklim Değişikliğine Uyum Stratejik Planı" hazırlanmıştır. Ormancılık uygulamalarının iklim değişikliğine uyumu ve ormanların direncini artırma amacıyla 9 strateji ve 51 eylem belirlenerek uygulama çalışmalarına başlanmıştır. Bu plan aynı zamanda 2023 yılında güncellenecek olan Ulusal İklim Değişikliğine Uyum Stratejik Planı'nın ormancılık bölümleri için temel oluşturacaktır (Orman Genel Müdürlüğü, 2020).

3. İklim değişikliği ve hava kirliliğinin orman sağlığına etkilerini inceleyen Hava Kirliliğinin Ormanlar Üzerindeki Etkilerinin Değerlendirilmesi ve İzlenmesine İlişkin Uluslararası İşbirliği Programı (ICP Ormanlar- ICP Forest) kapsamında OGM, 2008 yılından bu yana ormanları izlemektedir. Bu "Orman Ekosistemlerinin İzlenmesi Programı" kapsamında yapılan gözlemler iklim değişikliğinin etkilerini de ortaya koymaktadır. Ülkemiz genelinde toplam 664 adet gözlem alanında ağaçların taç durumu ve hasar tespit görsel değerlendirme çalışmaları tamamlanarak yıllık raporlar hazırlanmıştır. En son ICP gözlem raporuna göre 2008 ile 2018 yılları arasında ağaçların yaprak dökümü oranlarının genel olarak arttığı (örneğin, Quercus coccifera, Pinus brutia; sırasıyla %2,35, %5,4) gösterilmiştir. Aynı raporda, bu etkilerin sera gazı salınımının bir sonucu olduğu ve iklim değişikliğinin etkileri olarak görüldüğü belirtilmiştir (ICP Forests, 2022).

4. İklim değişikliği, türlerin fenolojileri ve yayılış alanlarında hangi değişikliklere yol açabileceğini göstermek amacıyla Ege Ormancılık Araştırma Enstitü Müdürlüğü'nde "Ege Bölgesi Fıstıkçamı (Pinus Pinea L.) Alanlarında Çiçek Fenolojisi ve Tohum Tutumuna Etkisi" ve "Hava Kirliliğinin Soma Yöresinde Kızılçam Ormanlarına Etkisinin Araştırılması" projeleri yürütülmektedir (Ege Ormancılık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü, 2022).

5. Seyhan Havzasında uygulanan "Orman Ekosistemi ve Ormancılığın İklim Değişikliğine Uyum Projesi"nin 2020, 2050, 2080 yıllarına yönelik projeksiyonları ile ağaç türü dağılımlarında enlem ve boylamsal değişimler öngörülmüştür. Bu projeksiyonlara göre ağaç türlerinin artan sıcaklıklar yüzünden kuzeye ya da dağlar gibi daha yüksek rakımlara kayacağı beklenmektedir. Su azlığına bağlı olarak da fidanların çimlenme ve hayatta kalma başarısı azalabilecektir. Başka alanlara göç edemeyen ve bulundukları yerlerde uyum sağlayamayan türlerin yok olabilecekleri değerlendirilmektedir.

6. 2013 yılında OGM ve Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı (UNDP) iş birliğinde uygulanmaya başlanan "Akdeniz Ormanlarının Entegre Yönetimi Projesi" kapsamında Akde-

niz Bölgesi'nin ekolojik ve sosyo-ekonomik özelliklerini temsil eden Andırın, Pos, Gülnar, Gazipaşa ve Köyceğiz'de ormanların verimli kullanımı ve sürekliliğini sağlamaya yönelik planlar hazırlanarak devreye alınmıştır. Bu proje ile biyolojik çeşitlilik, yangın yönetim planları, karbon odaklı deneme alanları, böcek zararlılarının yayılış haritaları, ekoturizm alanları, odun dışı orman ürünleri ve endüstriyel ağaçlandırma alanları orman amenajman planlarına entegre edilmiştir. Projeyle ayrıca, biyolojik çeşitliliğin korunması, karbon emisyonunun azaltılması ve sosyal faydalar gibi ormanların sağladığı tüm yararlar bir arada gözetilerek, alınacak tedbir ve faaliyetleri içeren örnek amenajman planları da hazırlanmıştır (UNDP, 2022).

7. İklim değişikliği ile mücadele havza ve peyzaj seviyesinde mücadele gerektirmekte olup, bu kapsamda Dünya Bankası ile işbirliği halinde "Türkiye Dayanıklı Peyzaj Entegrasyon Projesi/ Turkey Resilient Landscape Integration Project (TULIP) hayata geçirilmiştir (The World Bank, 2022).

2021-2028 yıllarında uygulanacak proje ile;

- Tarım, ormancılık ve balıkçılığın daha verimli ve sürdürülebilir yapılmasını sağlamak,
- Açlığı bitirmek, gıda güvenliğine ve iyi beslenmeye ulaşmak ve sürdürülebilir tarımı desteklemek,
- 2030'a kadar sürdürülebilir gıda üretim sistemlerini sağlamak, üretkenliği ve üretimi artıran dayanıklı tarım uygulamalarını uygulamak,
- Su ve atık suyun herkes için kullanılabilirliğini ve sürdürülebilir yönetimini sağlamak,
- 2030'a kadar su kıtlığına çözüm getirmek ve su kıtlığı çeken insan sayısını önemli ölçüde azaltmak üzere, su kullanım verimliliğini tüm sektörlerde büyük ölçüde artırmak ve sürdürülebilir tatlı su çıkarma ve tedarikini temin etmek,
- Şehirleri ve insan yerleşimlerini kapsayıcı, güvenli, dayanıklı ve sürdürülebilir kılmak,
- 2030'a kadar, yoksulları ve kırılgan durumdaki insanları korumaya odaklanarak, su kaynaklı afetler de dâhil olmak üzere afetlerden kaynaklanan ölümleri ve etkilenen insan sayısını kayda değer miktarda azaltmak ve ekonomik kayıpların küresel GSYH içerisindeki göreli payını büyük oranda düşürmek,
- İklim değişikliği ve etkileri ile mücadele için acilen eyleme geçmek,
- Tüm ülkelerde iklim değişikliğiyle ilgili tehlikeler ile doğal afetlere karşı dayanıklılık ve uyum kapasitesini güçlendirmek,
- Karasal ekosistemleri korumak, iyileştirmek ve sürdürülebilir kullanımını desteklemek, sürdürülebilir orman yönetimini sağlamak, çölleşme ile mücadele etmek, arazi bozunumunu durdurmak ve tersine çevirmek, biyolojik çeşitlilik kaybını engellemek,

- Tüm orman türleri için sürdürülebilir yönetim uygulamasını teşvik etmek, ormansızlaşmayı durdurmak, bozulmuş ormanları restore etmek ve ormanlaştırma ve yeniden ağaçlandırmayı küresel düzeyde ciddi miktarda artırmak hedeflenmektedir (Orman Genel Müdürlüğü, 2022).

**8-** 4 Temmuz 2014 Tarihli ve 29050 Sayılı Resmî Gazetede (2014) yayımlanarak yürürlüğe giren "Ulusal Havza Yönetim Stratejisinde (2014-2023 yer alan hedeflerden birisi olan "Ulusal Havza Rehabilitasyonu Stratejisi-UHRS" hazırlıkları 2022 yılı itibariyle devam etmektedir (Ulusal Havza Rehabilitasyonu Stratejisi, 2022). Hazırlanan taslak Strateji Belgesine göre UHRS'nin vizyonu "Dünyadaki tüm yaşamın ve gelecek nesillerin sağlığı ve esenliği için; insanlar ve doğa arasındaki dengenin yeniden kurulduğu, sınırları belli, peyzaj değerleri bilinen, bozulmanın durdurulduğu ve iyileştirildiği, beşerî ve fiziksel tüm paydaşların katılımı ile ekosistem tabanlı olarak planlanan ve yönetilen, üretken, yerel, bölgesel, ulusal ve küresel şartlara entegre ve tehditlere dayanıklı havzalardır" şeklinde belirlenmiştir.

**9-** İklim değişikliği ve orman yangınları/orman ekosistemlerinin direnci arasında son derece yakın bir ilişki bulunmaktadır. Bu kapsamda OGM tarafından Dünya Bankası ile işbirliği halinde "İklime Dirençli Ormancılık Projesi-İDOP" hazırlıkları başlatılmıştır (GÖNDER, 2022). Projenin hazırlık belgesinde aşağıdaki hususlar yer almaktadır:

- Tüm insanlığı ve gezegenimizi etkileyen iklim değişikliği ve küresel ısınma orman yangınlarını da tetiklemekte, uzun süreli kuraklıklar ve artan sıcaklıklar nedeniyle orman yangınlarına müdahale zorlaşmaktadır.
- Son yıllarda tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de orman yangınları sayısı ve zararı büyük artış göstermekte olup, bu trendin artarak devam edeceği öngörülmekte, buna bağlı olarak da başta Akdeniz ülkeleri olmak üzere tüm dünya yeni tedbirler almaktadır. Amerika Birleşik Devletleri, İspanya, İtalya, Fransa gibi ülkeler orman yangınlarını "milli güvenlik sorunu" olarak ele almaya başlamıştır.
- Bir Akdeniz ülkesi olan Türkiye için orman yangınları kaçınılmaz bir gerçektir. Bu kapsamda, teknik ve siyasi olarak her türlü tedbir alınmaktadır. 1998 yılında meydana gelen orman yangınlarını takiben 30 Nisan 1999 tarihinde alınan Milli Güvenlik Kurulu kararı ile orman yangınları en üst seviyede ele alınmış ve mevzuat düzenlemeleri, personel, araç gereç alımı dâhil tüm unsurlar bir bütünlük içinde şekillendirilmiştir.
- Türkiye tarihindeki en büyük orman yangınlarından birisi 2021 yılı temmuz-ağustos aylarında meydana gelmiş, bu durum ülkemiz politika ve uygulamalarının yeniden ve bir bütünlük içinde ele alınmasını gerektirmiştir. Bu çerçevede 13-15 Ekim 2021 tarihlerinde ilgili tüm paydaşların katılım sağladığı "Küresel Isınma ve İklim Değişikliği Sürecinde Orman Yangınları Çalıştayı" düzenlenmiştir. Bu çalıştayda oluşturulan 9 çalışma grubu tarafından 135 karar, 217 eylem önerisi değerlendirilerek karara bağlanmıştır.

- Diğer taraftan ülkemizin "Paris Anlaşması"na katılımı 7 Ekim 2021 tarihli Resmî Gazetede yayımlanan Cumhurbaşkanlığı Kararı ile yürürlüğe girmiş, bu çerçevede orman yangınları ile ilgili projelerin finansmanına dair düzenlemeler getirilmiştir.
- İlgili çalıştay ve Paris Anlaşması kapsamında yapılabilecek faaliyetlerin yer aldığı "İklime Dirençli Ormancılık Projesi-İDOP" a dair ilk talep OGM'nin 27 Aralık 2021 tarihli yazısı ile Cumhurbaşkanlığı Strateji ve Bütçe Başkanlığına arz edilmiştir.
- Bu kapsamda müzakereler devam ederken Tarım ve Orman Bakanlığı Avrupa Birliği ve Dış İlişkiler Genel Müdürlüğü'nün 24 Şubat 2022 tarihli ve E-43531645-730.99-4634948 sayılı yazısı ile "Türkiye Hükümeti ile Dünya Bankası ve Kalkınma Ortakları arasında İklim Finansman Paketi Mutabakat Zaptı " imzalandığı belirtilmiştir.
- Yazıda "T.C. Cumhurbaşkanlığı Strateji Bütçe Daire Başkanlığı (SBB) ve Hazine ve Maliye Bakanlığı ile yapılan istişareler çerçevesinde söz konusu proje önerilerinin yıllık yatırım programına alınması gerektiği" belirtilerek proje tekliflerinin "Yatırım Programı Hazırlama Rehberi" ekinde yer alan Fizibilite Etüdü Formatına uygun şekilde hazırlanarak, SBB'nin değerlendirmesine sunulması" istenmiştir.
- Bu gelişmeler ışığında 25 Nisan 2022 tarihinde Orman Genel Müdürünün başkanlığında, Genel Müdür Yardımcıları ve Teftiş Kurulu Başkanlığı dâhil tüm birim amirlerinin ve ilgili uzmanların katıldığı kapsamlı bir değerlendirme toplantısı yapılmıştır.
- Bu bilgiler ışığında IDOP,
    - 2023-2025 Dönemi Yatırım Programı Hazırlama Rehberinin (Taslak) ekindeki Fizibilite Etüdü (Ek-1) formu esas alınarak 2023 yılı yatırım programında yer almak üzere hazırlanmıştır.
    - Finansmanının "Türkiye Hükümeti ile Dünya Bankası ve Kalkınma Ortakları arasında imzalanan iklim finansmanına yönelik "Mutabakat Zaptı" kapsamında Dünya Bankası'nca karşılanacaktır.
    - İDOP' un hazırlanmasında küresel seviyede "Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları" ve "BM Küresel Orman Hedefleri", ulusal seviyede ise "On Birinci Kalkınma Planı ve Orman Genel Müdürlüğü Stratejik Planı (2019-2023) esas alınmıştır.

## 5. Sonuç ve Değerlendirme

Tüm insanlık ve gezegenimiz için büyük ve açık bir tehdit oluşturan "iklim değişikliği"nin orman ekosistemleri üzerinde de kaçınılmaz etkileri olacağı aşikârdır.

Bu makalede Türkiye ormanlarını devlet ve millet adına "sürdürülebilir şekilde yönetmek" ile yükümlü olan Orman Genel Müdürlüğünün konuyla ilgili mevzuatı, yetkileri ve yapılan çalışmaların bir kısmı incelenmiştir.

Hem dünyada hem de Türkiye'de yapılan araştırmalar iklim değişikliğinin ormanlar ve orman ekosistemleri üzerinde büyük etkiler ortaya çıkaracağını öngörmektedir. Diğer taraftan ormanlar iklim değişikliğine uyum ve etkilerinin azaltılması konusunda en etkin araçlardan birisidir.

Yaklaşık 200 yıllık tarihi ile dünyadaki en eski, tecrübeli ve güçlü ormancılık teşkilatlarından birisi olan Orman Genel Müdürlüğü, diğer faaliyetleri ile birlikte, iklim değişikliği için de gerekli hazırlıkları yapmaktadır.

## 6. Kaynaklar / References

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (2012). Türkiye Cumhuriyeti İklim Değişikliği Eylem Planı 2011 – 2023. https://webdosya.csb.gov.tr/db/iklim/banner/banner591.pdf. Erişim Tarihi: 08.10.2022.

Ege Ormancılık Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü (2022). https://egearastirma.ogm.gov.tr/Yayinlar/Projeler/EGEPROJELER.pdf. Erişim Tarihi: 08.10.2022.

GÖNDER (2017). Geleceği Önemseyenler Derneği. BM Ormanlar Stratejik Planı-Küresel Orman Hedefleri ve Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri http://www.gonder.org.tr/?p=6144. Erişim Tarihi: 08.10.2022.

GÖNDER (2022). Geleceği Önemseyenler Derneği. İklime Duyarlı Ormancılık Projesi-IDOP http://www.gonder.org.tr/?p=11262. Erişim Tarihi: 08.10.2022.

ICP Forests (2022). The International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects on Forests. http://icp-forests.net/. Erişim Tarihi: 08.10.2022.

Massachusetts Institute of Technology (2021). Forest and Climate Change. https://climate.mit.edu/explainers/forests-and-climate-change#:~:text=As%20forests%20grow%2C%20their%20trees,greenhouse%20gas%20driving%20climate%20change Erişim Tarihi: 21.08.2023.

Orman Genel Müdürlüğü (2019). OGM Stratejik Planı 2019-2023. https://www.ogm.gov.tr/tr/e-kutuphane-sitesi/StratejikPlan/Orman%20Genel%20M%C3%BCd%C3%BCrl%C3%BC%C4%9F%C3%BC%20Stratejik%20Plan%20(2019-2023).pdf. Erişim Tarihi: 08.10.2022.

Orman Genel Müdürlüğü (2020). Ormancılıkta İklim Değişikliğine Uyum Stratejik Planı. https://www.ogm.gov.tr/tr/haber-sitesi/Documents/ormanlarimizi-iklim-degisikligine-karsi-daha-direncli-yapacak-9-strateji-51-eylem-onerisi/Ormanlar%C4%B1n%20%C4%B0klim%20De%C4%9Fi%C5%9Fikli%C4%9Fine%20Uyum%20Stratejisi%202020.pdf. Erişim Tarihi: 08.10.2022.

Orman Genel Müdürlüğü (2022). Türkiye Dayanıklı Peyzaj Entegresyonu Projesi https://tulip.ogm.gov.tr/SitePages/OGM/OGMDefault.aspx. Erişim Tarihi: 08.10.2022.

Resmi Gazete (2014). Ulusal Havza Yönetim Stratejisi (2014-2023) https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/07/20140704-23.htm. Erişim Tarihi: 08.10.2022.

The World Bank (2022). Turkey Resilient Landscape Integration Project (TULIP). https://projects.worldbank.org/en/projects-operations/project-detail/P172562. Erişim Tarihi: 08.10.2022.

UNDP (2022). Türkiye'de Yüksek Koruma Değerine Sahip Akdeniz Ormanlarının Entegre Yönetimi Projesi https://www.undp.org/tr/turkiye/projects/turkiyede-yuksek-koruma-degerine-sahip-akdeniz-ormanlarinin-entegre-yonetimi-projesi. Erişim Tarihi: 08.10.2022.

## Yazar Hakkında / About Author

**Bekir KARACABEY | Orman Genel Müdürlüğü |**
**bekirkaracabey[at]ogm.gov.tr | ORCID: 0009-0006-1293-5980**
Orman Yüksek Mühendisi Bekir Karacabey 2017 yılı Ağustos ayı itibariyle Orman Genel Müdürü olarak görev yapmaktadır. 1973 yılı Yozgat doğumlu olan Karacabey, 1993 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Fakültesi Orman Mühendisliği bölümünden mezun olmuştur. Meslek hayatı boyunca Orman İşletme Şefi, Orman İşletme Müdür Yardımcısı, Orman İşletme Müdürü, Orman Bölge Müdür Yardımcısı, Orman Bölge Müdürü, Orman Genel Müdür Yardımcısı dâhil tüm kademelerde görev yapmıştır. 2017 yılında Orman Genel Müdürlüğüne atanmıştır.

**Bekir KARACABEY | Directorate General of Forestry |**
**bekirkaracabey[at]ogm.gov.tr | ORCID: 0009-0006-1293-5980**
Mr. Bekir Karacabey, a Forest Engineer (MSc.) by training has been working as the General Director of the General Directorate of Forests as of August 20217. Born in Yozgat in 1973, Mr. Karacabey graduated from Karadeniz Technical University, Faculty of Forestry, Department of Forestry Engineering in 1993. Throughout his career, he served at all levels, including the Forest Sub-District Chief, the Deputy Director of Forest District, the Director of Forest District, the Deputy Director of Regional Forest Directorate, the Director of Region, the Deputy General Director of Forests. He was appointed by the President of Türkiye as the Director General of Forest in 2017.

# DİZİN / INDEX


## A

Aerosoller *37*, *312*

Afet Yönetimi *76*, *95*

Akarçay *16*, *160*, *162*, *183*

Akarsu havzası *173*, *175*, *216*

Akdeniz Bölgesi *21*, *73*, *388*

Akım gözlem istasyonları *84, 86*

Akış *15*, *79*, *81*, *84*, *86*, *113*, *123*, *127*, *146*, *177*, *178*, *182*, *185*, *216*, *218*, *252*, *333*, *340*

Albedo *39*

Anaerobik çürütme *256*

Analitik çözüm *321, 323, 324, 329, 341, 342, 345, 363, 364*

Ani taşkın *78*, *80*, *81*, *82*, *87*, *112*, *113*

Antalya *21*, *63*, *148*, *160*, *162*, *179*, *183*, *229*, *236*, *305*

Antropojenik *36*

Aras *148*, *162*, *179*, *216*, *217*

Atıksu arıtma tesisleri *192*, *229*, *256*, *259*

Atıksuların geri kazanımı *207*, *220*

Atıksuların tarımsal sulamada kullanımı *247*, *251*

Atıksu rafinerisi *173, 176*

Atlantik salınımları *56, 268*

Atmosfer *33*, *34*, *36*, *37*, *39*, *45*, *55*, *57*, *58*, *62*, *65*, *89*, *312*, *338*

Atmosfer gözlem istasyonu *56*, *62*

Avrupa Birliği *54*, *159*, *160*, *165*, *192*, *220*, *286*, *391*

Avrupa Çevre Ajansı *143*

Azot ve fosfor geri kazanımı *192*

## B

Bağıl nem *79*, *338*

Balıkçılık *245*, *265*, *274*, *276*, *278*, *306*, *315*

Baraj hazneleri *283*, *287*

Baraj seviyeleri *79*, *272*

Barometrik basınç *79*

Batı Karadeniz *20*, *148*, *160*, *162*, *175*, *179*

Besin elementleri *324*, *328*, *333*, *341*

Birleşmiş Milletler *13*, *18*, *51*, *53*, *103*, *137*, *145*, *197*, *210*, *271*, *285*, *286*, *293*, *312*, *382*, *385*, *386*, *388*

Bitki deseni *162*

Biyoçeşitlilik kaybı *143*

Biyokütle *303*, *314*, *324*

Biyolojik çeşitlilik *307*, *381*, *389*

BMİDÇS *53*, *54*, *312*, *386*

Bölgesel iklim modelleri *31*

Bölgesel kuraklık *123*, *127*

Bölgesel modeller *36*

Buharlaşma hızı *148*

Bütünleşik atıksu yönetimi *173*, *176*

Bütünleşik su yönetimi *6*

Buz kütlesi *55*

Buzul Çağı *267*

## C

Can kaybı *20*, *85*

CH4 *74*

CO2 *5*, *7*, *34*, *36*, *37*, *38*, *53*, *74*, *152*, *267*, *268*, *294*, *312*, *381*

COP *53*, *54*, *312*

## Ç

Çamur çürütücüler *256*

Çamurlarının tarımsal alanlara uygulanması *257*

Çevre Dostu Bina tasarımı *195*

Çığ *56*, *73*, *76, 78*, *81*, *90*, *103*, *111*, *115*

Çölleşme *73*, *92*, *103*, *135*, *382*, *389*

Çoruh *148*, *162*, *179*

## D


Deniz suyu *6*, *58*, *230*, *236*

Desalinasyon *213*, *219*, *230*, *231*, *232*

Devlet Su İşleri *11*, *19*, *22*, *24*, *27*, *28*, *68*, *79*, *89*, *131*, *165*, *177*, *233*

Diazot monoksit *74*

Dirençli bitki türleri *379*

Doğal afetler *1*, *5*

Doğal gaz santralleri *301*, *309*

Doğu Akdeniz *43*, *54*, *160*, *162*, *175*, *178*, *180*, *183*

Doğu Karadeniz *16*, *20*, *148*, *160*, *162*, *179*

Dolu fırtınaları *73*

DSİ *22*, *23*, *79*, *84*, *86*, *89*, *131*, *169*, *177*, *188*, *195*, *198*, *214*, *215*, *233*, *251*, *260*, *271*

Dünya Meteoroloji Teşkilatı *53*, *101*, *103*


## E


Ekosistem hizmetleri *149*, *177*, *381, 382*

Elektrodiyaliz *230*

Enerji üretimi potansiyeli *143*

Entegre su yönetimi *173*

Erken uyarı *65*, *73*, *77*, *78*, *79*, *80*, *81*, *83*, *84*, *86*, *87*, *88*, *99*, *110*, *112*, *113*, *386*

Erken Uyarı Sistemi *78*, *80, 81*, *82*, *84*, *86*, *112*, *113*, *114*, *115*

Evaporasyon *211*

Evapotranspirasyon *45*, *211*, *337*

Evapotranspirasyon İndeksi *44*


## F


Falkenmark Göstergesi *213*

Fırat-Dicle havzası *75*

Fosil yakıtları *51*, *74*


## G


GAP *47*, *281*, *282*, *292*, *306*

Geri kazanım *192*, *213*, *216*, *220*, *222*, *229*, *230*, *245*, *249*, *254*, *255*

Gıda arzı *151*

Gıda güvenliği *383*, *389*

Gözlem ağlar *90*

Gözlem sistemi *56*, *61*, *63, 65*

Gri su *6*, *192*, *193*

Gri su geri kazanımı *193*

Güneş enerjisi *23*, *281*, *287*, *288*, *303*

Güneşli gün sayısı *287*

Güneş patlamaları *267*, *268*


## H


Havaalanı *56*, *59*, *60*

Hava kalitesi *265*, *275*

Hava sıcaklığı *57*, *60*, *123*, *275*, *333*, *334*, *336*, *341*, *345*

Hava tahmin modelleri *99*

Havza esaslı planlama *151*, *160*

Havza su tahsis planları *151*

Havza yönetim heyetleri *159*, *160*, *161*, *166*, *167*,

Hayvansal üretim *143*

Heyelan *66*, *116*

Heyelan riski *144*

Hidroelektrik santraller *23*, *301*

Hidroelektrik üretim *301*, *305*

Hidrolik enerji *281*, *283*, *284*, *285*, *286*, *287*, *289*, *291*, *292*

Hidrolik enerji üretimi *283*, *286*

Hidrolojik döngü *11*, *13*, *45*, *127*

Hidrolojik model *146*, *149*, *177*

Hidrolojik modelleme *84*, *149*, *173*

Hidrolojik sistem *145*

Hidrometeorolojik afetler *73*, *89, 92*

Hidrostatik modeller *106*

Hükümetlerarası İklim Değişimi Paneli *175*


## I


IPCC *17*, *18*, *21*, *25*, *33*, *34*, *35*, *37*, *39*, *44*, *46*, *51*, *52*, *53*, *73*, *74*, *93*, *99*, *100*, *112*, *116*, *127*, *134*, *150*, *152*, *175*, *176*, *185*, *187*, *199*, *215*, *243*, *244*, *286*, *312*

Isıtıcı gazlar *267*

## İ


İçsu ekosistemleri *321*, *323*

İDHYKK *54*

İDKK *54*

İklim değişikliği *1*, *2*, *5*, *6*, *17*, *46*, *51*, *53*, *54*, *65*, *66*, *93*, *95*, *99*, *112*, *116*, *117*, *127*, *129*, *135*, *143*, *145*, *152*, *160*, *165*, *181*, *182*, *183*, *184*, *185*, *186*, *195*, *199*, *200*, *215*, *229*, *230*, *233*, *243*, *260*, *285*, *286*, *293*, *295*, *312*, *313*, *315*, *316*, *382*, *386*, *390*, *392*

İklim değişikliği eylem planı *185*, *186*, *199*, *392*

İklim değişikliğine uyum *22*, *150*, *151*, *388*, *392*

İklim değişimi *1*, *31*, *33*, *34*, *41*, *73*, *74*, *173*, *175*, *176*, *187*, *188*, *191*, *198*, *202*, *243*, *334*, *345*

İklim değişimine uyum *31*, *197*

İklim değişimi projeksiyonları *176*

İklim değişkenliği *48*, *51*

İklime dirençli ormancılık *390*, *391*

İklime uyum sağlama *145*

İklim modeli *36*, *42*, *51*, *55*, *146*, *176*, *178*, *187*, *188*

İklim modellemesi *48*, *173*, *175*

İklim modelleri *31*

İklim parametreleri *175*

İklim Projeksiyonları *38*, *54*, *66*, *135*, *178*, *179*, *180*, *316*

İklim salınımı *74*

İklimsel döngüler *268*

İklim senaryoları *31*, *34*

İklim sistemi bileşenleri *33*, *36*, *37*

İl su yönetimi *160*, *161*, *166*, *168*

İyimser senaryo *176*

İyi su durumu *160*

İzinsiz kuyular *132*


## J


Jeotermal *281*, *303*, *314*

Jeotermal Enerji *137*


## K


Kar *13*, *19*, *33*, *40*, *43*, *44*, *45*, *56*, *57*, *73*, *76*, *81*, *83*, *91*, *111*, *112*, *113*, *141*, *144*, *145*, *149*, *245*, *283*

Kararlı durum *327*, *331*, *332*, *333*, *341*

Karbondioksit *74*, *127*, *381*

Karbon yutağı *381*

Karla kaplı alanlarda azalma *144*

Kayıpların azaltılması *151*

Kent atıksuları *243*, *245*, *254*

Kentsel su temini *175*, *176*

Kentsel yağmursuyu yönetimi *194*

Kızılırmak *160*, *162*, *183*

Konya Kapalı Havzası *131*, *183*, *184*, *185*, *250*, *260*

Konya Ovası *131*

Koruma planları *157*, *159*, *163*, *167*, *168*, *197*

Koruyucu planlama *77*

KOSKİ *252*, *254*, *255*, *260*

Kötümser senaryo *45*, *176*

Kullanım-mevcudiyet oranı *213*, *214*

Kuraklık *1*, *13*, *17*, *18*, *20*, *22*, *23*, *41*, *44*, *56*, *71*, *73*, *76*, *77*, *78*, *89*, *90*, *91*, *92*, *103*, *115*, *119*, *127*, *135*, *143*, *145*, *146*, *149*, *150*, *151*, *152*, *161*, *162*, *166*, *176*, *185*, *197*, *218*, *265*, *267*, *268*, *269*, *272*, *273*, *274*, *276*, *301*, *306*, *307*, *308*, *310*, *311*, *379*, *381*, *382*

Kuraklık ve talep yönetimi *176*

Kuraklık yönetim planları *149*, *150*, *151*

Küresel ısınma *33*, *39*, *74*, *127*, *145*, *267*, *283*, *313*, *390*

Küresel modeller *106*

Küresel orman hedefi *379*, *382*, *383*, *384*, *385*, *386*

Kütle dengesi *324*, *325*

Kyoto protokolü *53*, *286*, *293*, *312*


## L


Levha tektoniği *267*


## M


Mal kaybı *77*

Marmara Havzası *180*, *181*, *182*

Master plan *199*

MBR sistemleri *223*
Mekanizma tabanlı modeller *321*
Membran fiyatları *229*
Membran Teknolojileri *220*, *234*, *236*, *237*, *238*, *239*
Metan *74*, *256*, *267*
Meteoroloji Genel Müdürlüğü *46*, *51*, *54*, *57*, *65*, *66*, *68*, *79*, *89*, *99*, *101*, *103*, *109*, *111*, *114*, *115*, *117*, *119*, *135*, *277*, *310*, *316*
Meteoroloji gözlem istasyonu *56*, *57*, *58*, *59*, *60*
Meteorolojik afetler *55*, *66*, *71*, *73*, *80*, *99*, *115*
Meteorolojik parametreler *58*, *114*
Meteorolojik uyarı *84*
Meteoroloji radarı *61*, *78*, *110*
MeteoUYARI *111*, *112*
Mevsim normalleri *307*
MGM *42*, *46*, *51*, *54*, *55*, *56*, *57*, *58*, *59*, *60*, *61*, *62*, *64*, *65*, *66*, *79*, *81*, *82*, *84*, *86*, *89*, *90*, *92*, *99*, *101*, *102*, *103*, *104*, *105*, *106*, *111*, *112*, *113*, *114*, *117*, *129*, *135*, *270*, *277*, *310*, *311*, *312*
Mikrofiltrasyon *220*, *249*
Mikrokirleticiler *160*
Mikroorganizma *220*
Milankovitch döngüleri *267*
Milli enerji ve maden politikası *303*
Modelin doğrusallaştırılması *343*

## N

N2O *74*
Nanofiltrasyon *220*, *249*
Nehir havza yönetim planları *157*, *159*, *160*, *161*, *167*
NHYP *157*, *160*, *161*
Nüfus artış eğilimleri *177*
Nüfus artışı *16*, *35*, *36*, *55*, *92*, *123*, *132*, *159*, *207*, *209*, *219*, *243*, *271*, *283*, *284*
Nükleer enerji *289*

## O

Okyanus *33*, *36*, *37*, *39*, *41*, *45*, *55*, *313*
Orman ekosistemleri *379*
Orman enstrümanı *385*
Orman Genel Müdürlüğü *114*, *379*, *387*, *388*, *390*, *391*, *392*, *393*
Ormanların bozulması *382*
Ormanlar stratejik planı *382*, *392*
Ormansızlaşma *150*, *381*, *382*, *386*
Orman sözleşmesi *385*
Orman ve Su İşleri Bakanlığı *28*, *54*, *117*, *152*, *169*, *173*, *175*, *199*, *200*
Orman yangınları *56*, *73*, *81*, *103*, *114*, *115*, *119*, *143*, *379*, *381*, *382*, *390*, *391*

## Ö

Özdeğer ve özvektör *365*

## P

Paris İklim Anlaşması *386*
Pasifik ve Atlantik Salınımları *268*
Patojen mikroorganizmalar *220*
Peyzaj sulaması *245*
Plankton *268*, *277*
Plansız şehirleşme *51*, *145*
Politika belirleyiciler *34*, *38*

## R

Radiatif zorlama *33*, *36*
RCP2.6 *34*, *35*
RCP4.5 *21*, *35*, *42*, *45*, *51*, *52*, *66*, *146*, *148*, *176*, *178*, *179*, *180*, *182*, *187*, *189*, *311*
RCP6 *35*
RCP8.5 *21*, *35*, *36*, *41*, *42*, *43*, *44*, *45*, *47*, *51*, *52*, *66*, *146*, *150*, *176*, *178*, *180*, *182*, *187*, *189*, *311*, *312*
RCP senaryoları *31*
Regresyon analizi *321*, *323*
Renk kodları *112*
Restorasyon *383*
Ruhsatsız kuyular *123*
Rüzgâr enerjisi *288*, *289*, *314*
Rüzgâr hızı *57*, *58*, *61*, *64*, *287*, *338*
Rüzgârlı günlerin sayısı *287*

## S


Sakarya Havzası *160*

Sera gazı *23*, *34*, *35*, *36*, *38*, *41*, *43*, *51*, *53*, *101*, *143*, *150*, *175*, *185*, *197*, *312*, *313*, *381*, *386*, *388*

Sera gazları *36*, *38*, *53*, *73*, *267*

Seyhan Havzası *388*

Simülasyon modelleri *321*

Sıcak hava dalgaları *81*, *143*, *151*, *215*, *307*, *381*

Sıcaklık *1*, *5*, *13*, *33*, *34*, *38*, *39*, *40*, *41*, *42*, *43*, *45*, *54*, *55*, *56*, *58*, *59*, *62*, *64*, *75*, *79*, *84*, *101*, *106*, *123*, *127*, *141*, *143*, *144*, *145*, *146*, *151*, *175*, *185*, *188*, *267*, *268*, *269*, *271*, *274*, *283*, *293*, *306*, *307*, *312*, *313*, *337*, *338*, *341*, *381*

Sığ sulak alanlar *324*

Soğutucu Gazlar *268*

Sosyo-ekonomik rotalar *35*

SSP1-1.9 ve 2.6 *35*

SSP2-4.5 *35*, *38*

SSP3-7.0 *35*, *38*

SSP5-8.5 *36*, *38*, *41*

SSP'ler *35*, *187*

SSP senaryoları *31*, *35*, *44*

SSTP *157*, *161*, *162*

Su açığı *141*, *148*, *178*, *180*

Su bilgi sistemi *160*, *161*

Su bütçesi *190*

Su çevrimi *228*

Su döngüsü *211*, *381*

Su ekosistemi *324*, *325*, *333*, *335*, *336*, *341*, *342*, *343*, *344*, *345*, *346*

Su ekosistemi modeli *346*

Su ekosistemleri *13*, *324*, *330*, *333*, *345*

Su fazlası *146*, *148*, *173*, *177*, 178, *179, 180*

Su geri kazanımı *192*, *193*, *219*, *220*, *229*, *231*

Su kalitesi *18*, *27*, *195*, *196*, *202*, *229*, *258*, *345*, *381*

Su kanalizasyon idareleri *176*

Su kayıpları *132*

Su kaynakları *5*, *11*, *13*, *14*, *16*, *17*, *22*, *23*, *24*, *27*, *28*, *41*, *126*, *127*, *132*, *141*, *145*, *146*, *151*, *153*, *157*, *160*, *162*, *167*, *173*, *175*, *191*, *202*, *210*, *214*, *228*, *243*, *245*, *265*, *283*, *345*

Su kaynaklarının dağılımı *13, 14*

Su kaynaklarının kullanımı *215*

Su kıtlığı *5*, *15*, *16*, *18*, *24*, *159*, *195*, *207*, *212*, *213*, *216*, *231*, *243*, *245*, *246*, *389*

Sulak alanlar *257*, *272*, *321*, *323*, *324*, *337*

Sulama randımanı *22*

Sulama suyu kalite kriterleri *253*

Sülfür gazı *268*, *273*

Sünger şehir *195*, *196*

Su planlaması *173*

Su potansiyeli *16*, *148*, *162*, *177*, *187*, *190*, *214*, *215*, *243*, *246*, *250*

Sürdürülebilir kalkınma *35*, *186*, *197*, *379*, *382*, *383*, *384*, *385*, *386*, *391*, *392*

Sürdürülebilir kentsel drenaj *176*, *196*

Sürdürülebilir orman yönetimi *381*, *383*

Su seviyesi *80*, *84*, *87*, *90*, *270*, *286*

Su sıcaklığı *321*, *323*, *333*

Su stresi *13*, *15*, *18*, *19*, *44*, *126*, *128*, *129*, *159*, *207*, *212*, *213*, *214*, *215*, *246*

Su tahsis planları *151*, *157*, *161*, *162*, *167*, *168*

Su tarifesi *173*, *192*

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü *23*, *27*, *141*, *146*, *149*, *152*, *153*, *157*, *159*, *167*, *168*, *169*, *173*, *175*, *199*, *200*

SYGM *42*, *82*, *86*, *87*, *94*, *146*, *147*, *148*, *150*, *151*, *152*, *159*, *160*, *161*, *162*, *163*, *164*, *165*, *166*, *167*, *168*, *173*, *174*, *175*, *183*, *200*


## Ş


Şamandıra *56*, *59*

Şehir ısı adası *34*

Şiddetli hava olayları *81*, *111*

Şiddetli rüzgâr *56*

Şiddetli yağış *104, 112*

Şiddetli yerel fırtınalar *73*, *103*

## T


Taban su stresi *18*

Tahliye kanalı *252*, *253*

Tarımsal su ihtiyacı *143*

Tarımsal sulama *17*, *123*, *128*, *129*, *210*, *211*, *243*, *247*, *249*, *306*, *315*

Tarım ve Orman Bakanlığı *23*, *27*, *141*, *152*, *153*, *157*, *159*, *165*, *169*, *173*, *175*, *272*, *277*, *391*

Taşkın yönetim planı *86*

TEİAŞ *304*, *305*, *306*, *308*, *309*, *310*

Temiz enerji kaynakları *287*

Terleme *145*, *211*

Ters osmoz *207*, *220*, *230*, *237*, *238*, *239*

Toprak nemi *33*, *57*, *79*, *81*, *113*, *283*

Türkiye iklim projeksiyonları *66*, *135*

Türkiye'nin su potansiyeli *234*, *246*

Türkiye projeksiyonları *41*

Tuz Gölü *252*


## U


Ultrafiltrasyon *220*

Ulusal enerji planı *301*, *314*, *315*

UNEP *51*, *52*, *53*

Ürün desenleri *272*, *276*

Ürün verimi *143*

Uzaktan algılama *61*, *62*, *119*, *133*


## V


Vahşi sulama *276*

Van Gölü *148*, *179*

Volkanlar *268*


## Y


Yağış *1*, *13*, *15*, *17*, *18*, *20*, *21*, *22*, *33*, *38*, *39*, *40*, *41*, *42*, *43*, *45*, *54*, *55*, *56*, *57*, *59*, *64*, *73*, *75*, *78*, *79*, *80*, *81*, *82*, *83*, *84*, *86*, *87*, *89*, *90*, *91*, *92*, *101*, *102*, *105*, *123*, *127*, *141*, *143*, *145*, *146*, *148*, *175*, *177*, *180*, *183*, *185*, *188*, *212*, *214*, *218*, *250*, *251*, *267*, *268*, *269*, *270*, *272*, *274*, *292*, *301*, *307*, *311*, *312*, *313*, *315*, *333*, *334*, *335*, *336*, *337*, *339*, *340*, *341*, *345*, *379*

Yağış azlığı *311*, *379*

Yağış indeksi *44*

Yağış istasyonları *78*, *86*, *90*

Yağış rejimi *21*, *146*

Yağış yoğunluğu *79*

Yağmur çağı *267*

Yağmur suyu hasadı *6*, *151*, *152*, *185*, *193*, *219*

Yağmursuyu şebekeleri *194*, *197*

Yanlış tarım *272*

Yapay sulak alanlar *257*

Yeniden kullanım *220*, *229*, *245*, *246*

Yeniden ormanlaştırma *383*

Yenilenebilir enerji *23*, *185*, *187*, *288*, *289*, *292*, *303*, *313*, *314*

Yenilenebilir kurulu güç *304*

Yeraltı barajları *276*

Yeraltı su kaynakları *146, 218*

Yeraltı suyu *1*, *15*, *17*, *22*, *24*, *177*, *211*, *217*, *222*, *245*, *246*, *258*, *259*, *272*, *336*, *379*

Yeraltısuyu beslenmesi *133*

Yeraltı suyu kaynakları *22*, *217*

Yerel yönetimler *87, 88, 173*

Yerüstü ve yeraltı suyu potansiyeli *177*

Yeryüzü *53*, *55*, *379*

Yeşil alanlarının sulanması *254*

Yeşilırmak havzası *84*

Yıldırım *56*, *62*, *65*, *73*, *115*

Yıldırım tespit ve takip sistemleri *65*

Yıllık su potansiyeli *271*

Yönü *35*, *57*, *58*, *59*, *60*, *61*, *64*, *79*, *110*

Yüksek çözünürlük *61*, *62*, *107*

Yüzey su kaynakları *218*


## Z


Zarar azaltma *77*, *92*

Bilindiği üzere iklim değişikliği temelde sanayi devrimi sonrasındaki endüstrileşme ve buna bağlı olarak karbon kaynaklı enerji kaynaklarının sınırsızca tüketilmesine dayanan ve etkilerini daha çok son yarım yüzyılda atmosferik olaylar ile hissedebildiğimiz bir olgu haline dönüşmüştür. Yağış rejimlerinin değişimi ve sıcaklık artışı sonucunda daha şiddetli ve daha çok tekrarlanan taşkın ve kuraklıklarla mücadele ediyor olmamız bu durumun en önemli göstergelerindendir. Bu durumdan başta su kaynakları olmak üzere enerji, hava, turizm, yerel yönetimler, şehir ve bölge planlama, mimarlık, tarım, orman, deniz, ulaştırma, spor ve ekonomi sektörleri doğrudan etkilenmişlerdir. Türkiye'nin, 2021 yılında Paris Anlaşması'nı imzalayarak, 2053 yılına kadar karbon emisyonlarında net sıfır taahhüdü vermesine paralel olarak günümüzde yapılacak araştırma ve projelerde esas alınması gereken temel unsur, yeşil kalkınma politikası doğrultusunda, iklim değişikliği ile mücadele ve uyuma yönelik planlanan eylemlere uygun çalışmaların yürütülmesidir. Bu bağlamda, 23-24 Eylül, 2022 tarihinde TÜBA tarafından İTÜ ev sahipliğinde düzenlenen "İklim Değişikliği Çerçevesinde Su Kaynaklarının Mevcut Durumu Ve Geleceği Çalıştayı" nın akademi ve kurumları bir araya getirerek sorunların en güncel hali ile ele aldığı, uyum ve mücadele için önerilerin gündeme getirilip tartışıldığı bir ortamın sonucu olarak bu kitap hazırlanmıştır.

TÜBA
TÜRKİYE BİLİMLER AKADEMİSİ
TURKISH ACADEMY OF SCIENCES

Piyade Sokak No: 27, 06690 Çankaya/ANKARA
Tel: +90 (312) 442 29 03 Faks: +90 (312) 442 72 36

www.tuba.gov.tr
www.facebook.com/**turkiyebilimlerakademisi**
twitter.com/**TUBA_TurkBlmAkd**

ISBN 978-625-8352-56-6
9 786258 352566