

**KÜRESEL İKLİM PROJEKSİYONLARI  
VE  
TÜRKİYE'DE İKLİM DEĞİŞİMİ**

**GLOBAL CLIMATE PROJECTIONS AND  
CLIMATE CHANGE IN TÜRKİYE**

---

*Yurdanur ÜNAL*



# KÜRESEL İKLİM PROJeksiYONLARI 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 ekstremeleri 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 radyatif 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<sub>2</sub>’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 kararlar üzerinde hava sıcaklığının okyanuslar üzerindeki 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 düzeltilmesi 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<sub>2</sub> eşdeğerinin (CO<sub>2</sub>e) 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<sub>2</sub>e 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<sub>2</sub>e civarında sabitlendiği bir orta emisyon senaryosunu temsil eder. Bu senaryo, küresel ısınmayı 2°C'nin altında sınırlama hedefiyle tutarlıdır, ancak RCP2.6'dan daha önemli emisyon azaltımları gerektirir.

RCP6: Sera gazı konsantrasyonlarının yüzyılın sonuna kadar 630 ppm CO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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 kullanılacak 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 radyatif 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 bilgilerimizi geliştirmek için kullandığımız araçlardır.

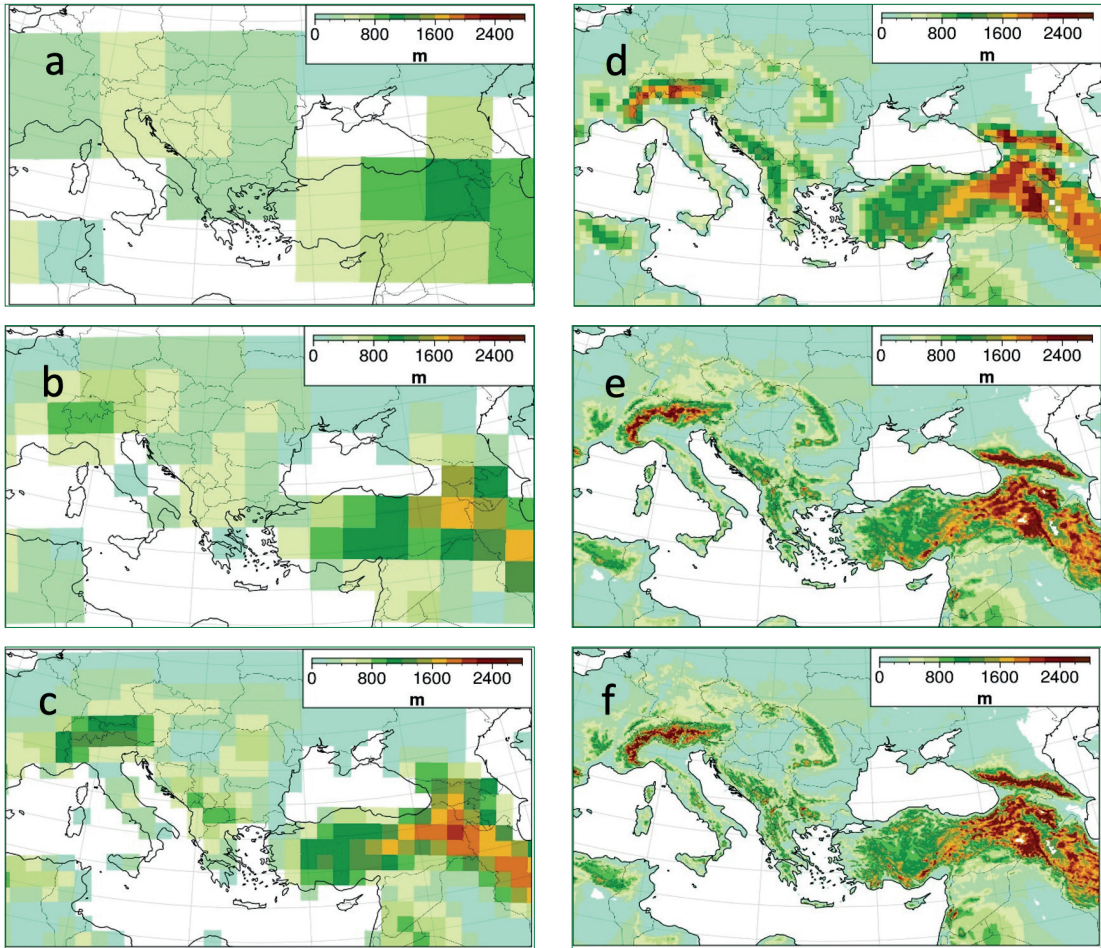
İklim sisteminin karmaşık yapısından dolayı, iklim değişiminin veya iklim değişkenliğinin nicel bir tahminine yönelik analizler kapsamlı üç boyutlu sayısal yer sistem modellerinin (iklim modelleri) kullanımına dayanmaktadır. Genel anlamda bir iklim modeli, iklim sisteminin fiziksel, biyolojik ve kimyasal ilkelere dayanan matematiksel bir temsildir ve türetilen denklemlerin lineer olmayışı nedeniyle sayısal olarak çözümleri gerekir. Sonuçta iklim modelleri ile boyutu modelin çözünürlüğüne bağlı olan bölgeler üzerindeki ortalama koşulların uzay ve zamanda ayrıntılı 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 bağıntular 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 batimetri, kayaların ve toprağın bazı özellikleri vb. gibi nispeten sınırlı bir veri gerekli olsa da, atmosfer, okyanus ve deniz buzu fiziklerini 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<sub>2</sub> konsantrasyonundaki değişiklikler modele bir radyatif zorlama olarak verilirken, iklim sistemi bileşenleri arasındaki karbon döngüsünü hesaplayan



modellerde bu girdilere paralel olarak CO<sub>2</sub> 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 artırmaktadır. 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 buzı, 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.

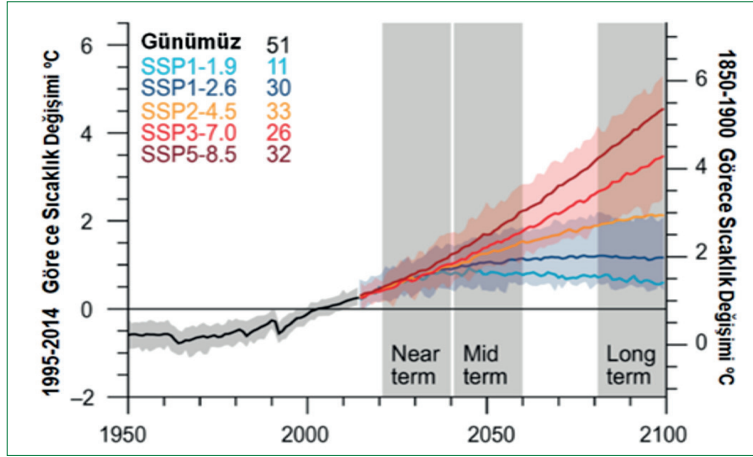
Küresel iklim projeksiyonları, atmosferdeki artan sera gazı konsantrasyonlarının bir sonucu olarak, dünyanın ortalama yüzey sıcaklığının önümüzdeki on yıllar ve yüzyıllar boyunca artmaya devam edeceğini göstermektedir.

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<sub>2</sub> ve diğer sera gazları emisyonlarında ciddi bir azaltma yapılmazsa küresel ortalama sıcaklıkların 21. yüzyıl içinde 2°C değerini aşmaması pek olası görünmemektedir. En düşük emisyon senaryosu SSP1 dahi yüzyılın sonunda (2081-2100) sıcaklıklardaki artışın 1,0-1,8 °C aralığında olacağını, orta SSP2 ve yüksek SSP5 emisyon senaryoları ise sırasıyla 2,1-3,5°C ve 3,3-5,7 °C aralıklarında olacağını öngörmektedir. Dolayısıyla, 2°C sıcaklık artışının hem orta hem de yüksek emisyon senaryolarında aşılması son derece muhtemel görülmektedir. 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 eşğin ortalama 2030 civarında aşılması, 2°C’lik eşğin aşılmasının SSP5-8.5 senaryosunda ortalama 2043 civarında ve 3°C’lik eşğin aşılmasının SSP5-8.5 senaryosunda yaklaşık 2062 yılında meydana gelmesi çok muhtemeldir. SSP1-1.9 ve SSP1-2.6 senaryolarında ise 2°C’lik eşğin aşılmama olasılığı mevcuttur. 4°C’lik eşğin aşılması SSP5-8.5 senaryosunda yüzyılın sonunda gerçekleşecektir. Dünyanın en son 3 ila 4 °C 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 ortalamadan 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 yarımkürenin 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 artırarak 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 ortalamadan katları kadar ısındığını göstermektedir. Yani, kuzey kutbu ısınması global ortalama ısınmayla doğrusal olarak değişmektedir. Güney yarımkürede Antarktika kıtasının, küresel ısınmanın tüm seviyelerinde aynı yarımkürede orta enlemlerdeki okyanus alanlarından daha yüksek oranda ısınması beklenmektedir. 21. yüzyılda güney yarımküre

yüksek enlemlerdeki 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 ortalama sıcaklıktan 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 hemfikirlerdir. 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 şiddetlenmektedir. 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 genişmesi 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 salınımının 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, kıyasal 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

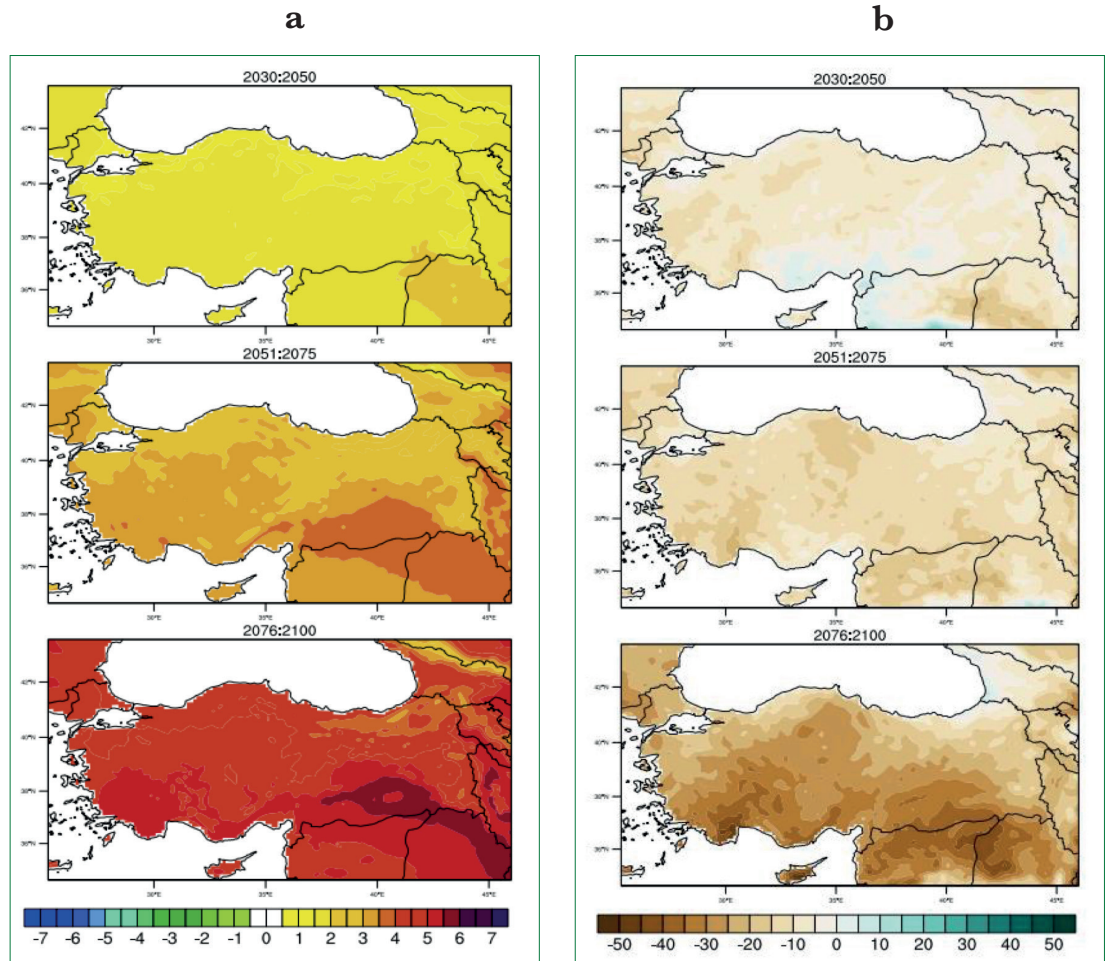
yaratabilir. Daha iyi çözünürlükte bilgi sağlamak için küresel iklim model çıktıları, bölgesel iklim modelleri ile dinamik ölçek küçültme yöntemi kullanılarak sınırlı alanlara transfer edilmektedir. Türkiye iklimindeki değişkenliğini araştırmak için birçok modelleme çalışması yapılmıştır. Ünal vd., (2001); Önal ve Semazzi (2009); Ünal vd., (2010); Bozkurt ve Şen (2011); Önal (2012); Önal ve Ünal (2014), Önal 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 parametrisasyonunu 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 yaklaşık 0,11 derece (12 km) çözünürlüklü COSMO-CLM bölgesel modelinin RCP8.5 için sıcaklık simülasyon sonuçlarını göstermektedir. Genel olarak sıcaklıktaki artışlar 2030’lu yıllardan 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.

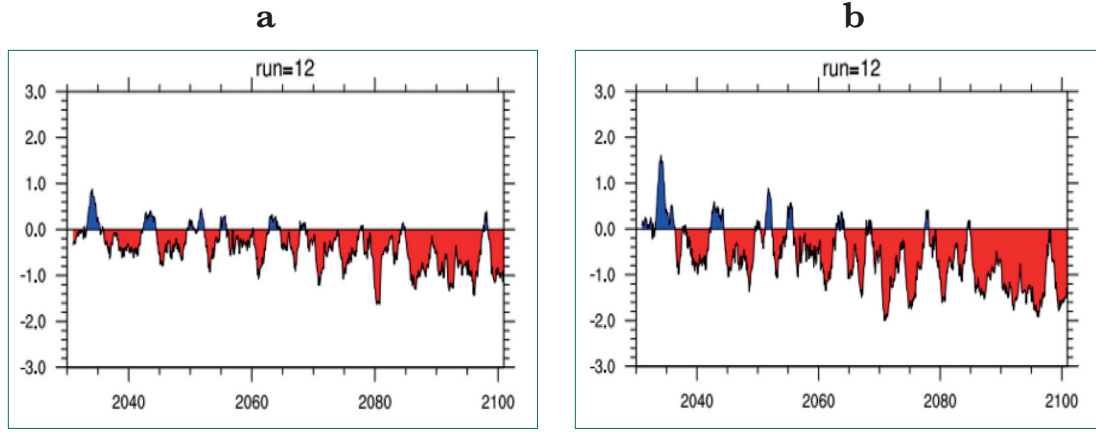


**Şekil 3.** RCP8.5 senaryosu için gelecek dönemlerde 2030-2050, 2051-2075, 2076-2100 ortalama referans 1989-2005 periyoduna göre **a)** sıcaklıkların değişimi, **b)** yağışların %olarak değişimi.

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 İndeksi (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 artırarak 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 uzaklaştırılmazsa 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 °C aralığında olacağını, yüksek emisyon senaryoları ise sırasıyla 3.3-5.7 °C aralıklarında olacağını öngörmektedir. Dolayısıyla, 2°C sıcaklık artışının hem orta hem de yüksek emisyon senaryolarında aşılması son derece muhtemel gözükmemektedir. 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°C ile 6°C 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 21st century. *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<sup>st</sup> 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., Buchignani, 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 İklimi: 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 Simulations 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 İstanbul 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. Ünal 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.