

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN SU GÜVENLİĞİNE ETKİSİ:
SUSURLUK HAVZASI ÖRNEĞİ

DOKTORA TEZİ

Murat ŞAN

ŞUBAT 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN SU GÜVENLİĞİNE ETKİSİ:
SUSURLUK HAVZASI ÖRNEĞİ

Murat ŞAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 / 01 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 02 / 02 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Adem BAYRAM

İkinci Danışmanı : Prof. Dr. Murat KANKAL

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“İklim Değişikliğinin Su Güvenliğine Etkisi: Susurluk Havzası Örneği” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmasının her aşamasında bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, öğrencisi olmaktan ve kendileriyle çalışmaktan onur duyduğum danışman hocam Prof. Dr. Adem BAYRAM ve Bursa Uludağ Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden ikinci danışman hocam Prof. Dr. Murat KANKAL’a minnet ve şükranlarımı sunmayı görev bilirim.

Kıymetli zamanlarını ayırarak tezimi değerlendiren ve önerilerde bulunan hocalarım, Prof. Dr. Ömer YÜKSEK, Prof. Dr. Fatma GÜLTEKİN, Prof. Dr. Turgay PARTAL ve Doç. Dr. İsmail DABANLI’ya teşekkür ederim.

Tez çalışmam sırasında karşılaştığım sorunların çözümünde bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak göstermiş olduğu fedakarlık için Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden Dr. Öğr. Üyesi Sinan NACAR’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Doktora süresince yardım ve destekleri için Abdullah AKBAŞ, Betül METE, Cavit KUMAŞ, Halil ANAÇ, H. İbrahim YÜKSEK, İlker ERKAN, K. Furkan ÖZTÜRK, M. Akif GÜNEN, Özhan BİNGÖL, Salih TÜRK, Şener ALİYAZICIOĞLU ve Yusuf KAYA’ya çok teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan canım annem Fatma ŞAN, babam Durmuş ŞAN ve kardeşim Dilek SAĞLAM’a tüm kalbimle teşekkür ederim. Bu süre zarfında bir emanet ve hediye olarak gelen evladımız Ali Salih ŞAN ile bu meşakkatli yolda anlayış ve fedakarlık örneği gösteren, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Hatice HAN ŞAN’a önce gönderene sonra kendilerine ayrıca teşekkürü borç bilirim. Öğrenim hayatım boyunca üzerimde emeği olan hocalarıma da teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının ülkemize yararlı olmasını ve bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Murat ŞAN
Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “İklim Değişikliğinin Su Güvenliğine Etkisi: Susurluk Havzası Örneği” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Adem BAYRAM ve ikinci danışmanım Prof. Dr. Murat KANKAL’ın sorumluluklarında tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 02/02/2024

Murat ŞAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Geçmişte Yapılmış Çalışmalar	7
1.2.1. İklim Değişikliği Çalışmaları.....	7
1.2.2. Su Güvenliği Çalışmaları	9
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	10
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	13
2.1. Çalışma Alanı	13
2.2. Gözlem verileri.....	15
2.3. ERA5 Yeniden Analiz Verileri	16
2.4. Genel Dolaşım Modelleri	17
2.5. Sosyo-Ekonomik Senaryolar	17
2.6. Su Tüketim Verileri.....	20
2.7. Çok Değişkenli Uyarlamalı Regresyon Eğrileri (ÇDURE)	21
2.8. Hidrolojik Modelleme	22
2.9. Su Güvenliği Parametreleri	24
2.10. Tahminleyici, Çözünürlük ve Sayısal Ağ Koşulu Seçim Metodolojisi.....	26
2.11. Yağış ve Sıcaklık Değerleri İçin İstatistiksel Ölçek İndirgeme Modellerinin Kurulumu.....	30
2.11.1. Günlük Yağış ve Sıcaklıklar İçin Model Performanslarının Değerlendirmesi	30
2.12. Gelecek Senaryolara Göre Yağış ve Sıcaklık Verilerinin Elde Edilmesi	32

2.13. SWAT Modelinin Kurulumu, Ayarlanması ve Su Güvenliği Hesaplamaları.....	35
3. BULGULAR VE İRDELEME	39
3.1. Tahminleyici, Çözünürlük ve Sayısal Ağ Koşulu Seçimi Bulguları.....	39
3.2. İstatistiksel Ölçek İndirgeme Modellerine Ait Performans Bulguları.....	42
3.3. Genel Dolaşım Modellerinin Belirlenmesi ve Çoklu Model Topluluğu Ortalamaları.....	49
3.4. Gelecek Senaryo Verilerinin Üretimi ve Yanlılık Düzeltme Süreci	53
3.5. Gelecek Dönem Yağış ve Sıcaklık Verilerinin Gözlem Verilerine Göre Değişimlerinin İncelenmesi.....	56
3.6. Susurluk Havzasının Geleceğe Yönelik Yıllık ve Mevsimsel Yağış ve Sıcaklıkların Mekansal İrdelenmesi	68
3.7. SWAT Hidrolojik Modelin Kurulumu	71
3.8. Su Güvenliği Parametrelerinin Geleceğe Yönelik Değişimleri	73
3.9. Genel Değerlendirme	81
4. SONUÇLAR.....	84
5. ÖNERİLER.....	88
6. KAYNAKLAR	90
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN SU GÜVENLİĞİNE ETKİSİ: SUSURLUK HAVZASI ÖRNEĞİ

Murat ŞAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Adem BAYRAM
İkinci Danışman: Prof. Dr. Murat KANKAL
2024, 107 Sayfa

İklim değışikliği ve artan tüketim suya olan talep artan ivmeyle su güvenliğini tehdit etmektedir. Bu nedenle geleceğe yönelik planlamaların yapılması ve önlemlerin alınması mavi ve yeşil su tabanlı su güvenliği (kıtlık ve hassasiyet) hesaplamasıyla mümkündür. Bu çalışmada yarı kurak Akdeniz ikliminin hakim olduğu Susurluk Havzası'nda referans döneme (1979-2014) göre yakın ve uzak gelecek (2030-2059 ve 2070-2099) için yağışa, sıcaklığa ve su güvenliğine ait değışimler incelenmiştir. Bunun için üç sosyoekonomik rotalar (SSP1-2.6, SSP3-7.0 ve SSP5-8.5) senaryolarını barındıran 14 adet genel dolaşım modeli (GDM) kullanılarak dokuz adet meteoroloji gözlem istasyonuna ait günlük toplam yağış, maksimum ve minimum sıcaklıklar için istatistiksel ölçek küçültme yapılmıştır. En uygun dört GDM ile çoklu model topluluğu ortalaması alınıp gelecek verileri SWAT hidrolojik modeline girilerek su tüketim verileriyle birlikte mavi ve yeşil su parametreleri hesaplanmıştır. Çalışma bulgularına göre yakın ve uzak gelecekte yıllık yağışlarda 120 ve 250 mm azalış, yıllık maksimum sıcaklıklarda $-4 - 1,5$ ile $0 - 4^{\circ}\text{C}$ 'lik ve yıllık minimum sıcaklıklarda $-1 - 1$ ile $1 - 5^{\circ}\text{C}$ 'lik azalış/artış beklenmektedir. Gelecekte mavi ve yeşil su depolamasında %70 ve 30 azalma olacağı, kıtlıkta ise %30 ve 20 değerlerinin %40'a yükseleceği öngörülmektedir. Ayrıca gelecekte Bursa ve Balıkesir çevrelerinin yeşil sudan ziyade mavi su kıtlığına maruz kalacağı tahmin edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: İklim değışikliği, Mavi ve yeşil su, Su güvenliği, Su kıtlığı, SWAT

PhD. Thesis

SUMMARY

THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON WATER SECURITY: THE CASE STUDY OF SUSURLUK BASIN

Murat ŞAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Adem BAYRAM
Second Supervisor: Prof. Dr. Murat KANKAL
2024, 107 Pages

Climate change and increasing consumption threaten water security with increasing demand for water. Therefore, it is possible to plan for the future and take precautions with blue and green water-based water security (scarcity and vulnerability) calculation. In this study, changes in precipitation, temperature, and water security for the near and far future (2030-2059 and 2070-2099) were analyzed for the Susurluk Basin, dominated by semi-arid Mediterranean climate, compared to the reference period (1979-2014). For this purpose, 14 general circulation models (GCMs) with three socioeconomic pathways (SSP1-2.6, SSP3-7.0, and SSP5-8.5) scenarios were used for statistical downscaling of daily total precipitation, maximum and minimum temperatures for nine meteorological observation stations. Future data were entered into the SWAT hydrological model by averaging the most appropriate four GCMs and multi-model ensemble, and blue and green water parameters were calculated together with water consumption data. According to the results of the study, a decrease of 120 and 250 mm in annual precipitation, a decrease/increase of $-4-1.5$ to $0-4^{\circ}\text{C}$ in annual maximum temperatures, and a decrease/increase of $-1-1$ to $1-5^{\circ}\text{C}$ in annual minimum temperatures are expected in the near and far future. It is predicted that there will be a decrease of 70% and 30% in blue and green water storage, while the values of 30% and 20% in scarcity will increase to 40% in the future. It is also estimated that Bursa and Balıkesir regions will be exposed to blue water scarcity rather than green water in the future.

Key Words: Climate change, Blue and green water, Water security, Water scarcity, SWAT

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Çalışmanın akış şeması.....	12
Şekil 2. Çalışmada kullanılan meteoroloji gözlem istasyonları, Susurluk Havzası	13
Şekil 3. Küresel CO ₂ ölçümleri ve SSP senaryolarına göre değişimleri (O'Neill vd., 2016).....	19
Şekil 4. Gözlem ve sosyo-ekonomik senaryolar bazında 1850-1900 dönemine kıyasla küresel sıcaklık değişimleri (IPCC, 2021)	19
Şekil 5. SWAT modelindeki temel hidrolojik süreçlerin gösterimi (Cüceloğlu, 2019).....	23
Şekil 6. Örnek ERA5 a) farklı sayısal durum gösterimi, b) farklı çözünürlük gösterimi	29
Şekil 7. Susurluk Havzası'nın 2000 yılına ait arazi kullanımı (CLMS, 2003).....	36
Şekil 8. Çalışmada kullanılan akım gözlem istasyonları, Susurluk Havzası	37
Şekil 9. Tüm olası regresyon yöntemine göre tahminleyici sıklığı	40
Şekil 10. Aylık NSE değerlerine göre sayısal ağ durumu ve çözünürlük belirleme (kırmızı kesikli çizgi 0,75 NSE değerine karşılık gelmektedir)	41
Şekil 11. İstatistiksel ölçek indirgeme model sonuçlarının aylık istatistiki değerlerinin değişimi	44
Şekil 12. İstatistiksel ölçek indirgeme model sonuçlarının günlük toplam yağış için saçılım grafikleri.....	45
Şekil 13. Günlük a) maksimum ve b) minimum sıcaklık model sonuçlarının saçılım grafikleri.....	48
Şekil 14. Genel dolaşım modellerinin istatistiksel ölçek indirgenmiş günlük yağış verileri için kümülatif yoğunlukları.....	50
Şekil 15. Genel dolaşım modellerinin istatistiksel ölçek indirgenmiş günlük maksimum (a) ve minimum (b) sıcaklık verileri için kümülatif yoğunluklular.....	51
Şekil 16. Günlük yağış verileri için yanlılık düzeltme bulguları	54
Şekil 17. Günlük (a) maksimum ve (b) minimum sıcaklık verileri için yanlılık düzeltme bulguları	55
Şekil 18. Yıllık ve mevsimsel toplam yağışların (a) gözlem dönemi ortalamaları (b) gözlem dönemine göre değişim miktarları ve (c) anlamlılıkları (*: anlamlı değişim)	57
Şekil 19. Yıllık ve mevsimsel toplam yağışların gözlem ve senaryo dönemlerine ait değişimleri	58

Şekil 20.	Aylık toplam yağışların (a) gözlem dönemi ortalamaları, (b) gözlem dönemine göre değişim miktarları ve (c) anlamlılıkları (*: anlamlı değişim)	59
Şekil 21.	Yıllık ve mevsimsel maksimum sıcaklıkların (a) gözlem dönemi ortalamaları, (b) gözlem dönemine göre değişim miktarları ve (c) anlamlılıkları.....	61
Şekil 22.	Yıllık ve mevsimsel maksimum sıcaklıkların gözlem ve senaryo dönemlerine ait değişimleri	62
Şekil 23.	Aylık maksimum sıcaklıkların (a) gözlem dönemi ortalamaları, (b) gözlem dönemine göre değişim miktarları ve (c) anlamlılıkları (*: anlamlı değişim)	63
Şekil 24.	Yıllık ve mevsimsel minimum sıcaklıkların (a) gözlem dönemi ortalamaları, (b) gözlem dönemine göre değişim miktarları ve (c) anlamlılıkları (*: anlamlı değişim)	65
Şekil 25.	Yıllık ve mevsimsel minimum sıcaklıkların gözlem ve senaryo dönemlerine ait değişimleri	66
Şekil 26.	Aylık minimum sıcaklıkların (a) gözlem dönemi ortalamaları, (b) gözlem dönemine göre değişim miktarları ve (c) anlamlılıkları (*: anlamlı değişim)	67
Şekil 27.	Geleceğe yönelik yıllık ve mevsimsel toplam yağış ortalamalarının mekana bağlı değişimleri.....	68
Şekil 28.	Geleceğe yönelik yıllık ve mevsimsel maksimum sıcaklık ortalamalarının mekana bağlı değişimleri	69
Şekil 29.	Geleceğe yönelik yıllık ve mevsimsel minimum sıcaklık ortalamalarının mekana bağlı değişimleri	70
Şekil 30.	SWAT çıktılarının saçılım ve zaman serisi grafikleri	72
Şekil 31.	Mavi su depolaması (MSD), tüketimi (MST), kısıtlığı (MSK) ve hassasiyetinin (MSH) gözlem ve gelecek dönem değişimleri.....	74
Şekil 32.	Mavi su bileşenlerinin alansal ortalamalarının yıllık ve mevsimsel değişimleri	75
Şekil 33.	Yeşil su depolaması (YSD), tüketimi (YST), kısıtlığı (YSK) ve hassasiyetinin (YSH) gözlem ve gelecek dönem değişimleri.....	77
Şekil 34.	Yeşil su bileşenlerinin alansal ortalamalarının yıllık ve mevsimsel değişimleri	78
Şekil 35.	Su güvenliği katsayılarının gözlem ve gelecek dönem değişimleri.....	80

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Susurluk Havzası'nda yer alan meteoroloji gözlem istasyonlarına ait konum bilgileri.....	15
Tablo 2. Susurluk Havzası'nda yer alan meteoroloji gözlem istasyonlarına ait yıllık temel istatistikler	16
Tablo 3. Çalışmada kullanılan sosyo-ekonomik senaryoların özellikleri (IPCC, 2021).....	20
Tablo 4. Çalışmada kullanılan ERA5 yeniden analiz tahminleyici değişkenleri.....	27
Tablo 5. İstatistiksel ölçek indirgeme modelleri için tutarlılık tablosu.....	32
Tablo 6. Çalışmada kullanılan akım gözlem istasyonları ve özellikleri (DSİ, 2023c)	37
Tablo 7. %1 anlamlılık düzeyinde Spearman korelasyon bulguları (mutlak değerler).....	39
Tablo 8. S1 istasyonu için tüm olası regresyon (APR) bulguları.....	40
Tablo 9. Yağışlı ve kurak günler için tutarlılık bulguları	42
Tablo 10. Günlük toplam yağış verilerinin ÇDURE model bulguları	46
Tablo 11. Maksimum ve minimum sıcaklıkların ÇDURE model performans bulguları.....	47
Tablo 12. Çalışmadan kullanılan genel dolaşım modelleri ve çözünürlükleri.....	49
Tablo 13. Genel dolaşım modellerinin performansları ve sıralamaları	52
Tablo 14. SWAT model kurulumu için kullanılan parametreler ve en uygun değerleri	71
Tablo 15. SWAT model kalibrasyonu performans sonuçlarıbulguları	71

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

APR	: All Possible Regression (Tüm olası regresyon)
BO	: Başarı oranı
CMIP5	: 5. birleştirilmiş model karşılaştırma projesi
CO ₂	: Karbondioksit
C1	: İstasyonun bulunduğu sayısal ağ durumu
C2	: İstasyona en yakın sayısal ağ merkezleri dikkate alınarak istasyonların çevresindeki dört sayısal ağ ortalama durumu
C3	: Havzanın sayısal ağ ortalaması durumu
ÇDURE	: Çok değişkenli uyarlamalı regresyon eğrileri
ÇMTO	: Çoklu model topluluğu ortalaması
DEM	: Digital Elevation Model (Sayısal yükseklik modeli)
DSİ	: Devlet Su İşleri
ECMWF	: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi)
GDM	: Genel Dolaşım Modeli
HRU	: Hyrdrological Response Unit (Hidrolojik birimleri)
IPCC	: Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli
ISIMIP	: Sektörler Arası Etki Modeli Karşılaştırma Projesi
İÖİ	: İstatistiksel ölçek indirgeme
JRA-55	: The Japanese 55-year Reanalysis (Japon 55 Yıllık Yeniden Analiz)
KDH	: Kantil delta haritalama
KGE	: Kling-Gupta verimlilik indeksi
KH	: Kantil haritalama
KK	: Gerçekte kuru gün iken modelde de kuru gün
KY	: Gerçekte kuru gün modelde yağışlı gün
KYF	: Kümülatif yoğunluk fonksiyonu
MERRA	: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications (Araştırma ve Uygulamalar için Modern Dönem Geçmişe Dönük Analiz)
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
MSD	: Mavi su depolaması

MSH	: Mavi su hassasiyeti
MSK	: Mavi su kıtlığı
MSKK	: Mavi su kıtlık katsayısı
MST	: Mavi su tüketimi
MSTK	: Mavi su tüketim katsayısı
NCAR	: National Center for Atmospheric Research (Ulusal Atmosferik Araştırma Merkezi)
NCEP	: National Centers for Environmental Prediction (Ulusal Çevresel Tahmin Merkezleri)
NSE	: Nash-Sutcliffe verimlilik indeksi
PBIAS	: Yanlılık katsayısı
ppm	: Parts per million (milyonda bir partikül miktarı)
R^2	: Belirleme katsayısı
PCP	: Representative Concentration Pathways (Temsili konsantrasyon rotaları)
SGE	: Sera gazı emisyonu
SRES	: Emisyon Senaryolarına İlişkin Özel Rapor
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission (Mekik Radar Topografya Operasyonu)
SS	: Standart sapma
SSP	: Shared Socioeconomic Pathways (Sosyoekonomik rotalar)
SWAT	: Soil Water Assessment Tool (Toprak ve Su Değerlendirme Aracı)
WMO	: World Meteorological Organization (Dünya Meteoroloji Örgütü)
UNEP	: United Nations Environment Programme (Birleşmiş Milletler Çevre Programı)
YGS	: Yağışlı günlerin sayısı
YK	: Gerçekte yağışlı gün modelde kuru gün
YSD	: Yeşil su depolaması
YSDK	: Yeşil su depolama katsayısı
YSH	: Yeşil su hassasiyeti
YSK	: Yeşil su kıtlığı
YST	: Yeşil su tüketimi
YY	: Gerçekte yağışlı gün iken modelde yağışlı gün

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünyamızın üçte ikisi sularla kaplı olmasına rağmen mevcut suyun sadece %2,5'i tatlı su kaynağıdır. Bu kaynağın da %68,7'u kutuplarda buzul, %30,1'u yeraltı suyu, %0,3'ü yüzey suları ve %0,9'i diğer sular olarak bulunmaktadır. Yüzey sularının ise %87'si göllerde, %11'i bataklıklarda ve %2'si akarsularda yer almaktadır. Yani genel olarak tatlı su olarak kullandığımız akarsulardaki sular dünya su bütçesinin yaklaşık milyonda ikisine bile karşılık gelmemektedir. Bu miktarların dağılımda rol oynayan en büyük parametre ise yağışlardır (Bayazıt, 1995). Ancak yağışların dünya üzerinde dağılımı homojen değildir. Örneğin Türkiye'nin yıllık toplam yağış ortalaması 573.4 mm (1991-2020) iken, Suudi Arabistan'da bu değer 93 mm'dir (Hasanean & Almazroui, 2015; URL-1, 2023).

Yağış değerleri sahip olduğu özelliklerin bir sonucu olarak belirli dönemlerde önceki yıllardaki ortalamalara göre artmakta ya da azalmaktadır. Yağışlarda yaşanan azalma uzun yıllar ortalamasından oldukça uzaklaşarak gerçekleşirse, su kaynaklarını ve tarım arazilerini olumsuz etkileyen ve hidrolojik döngüde önemli değişikliklere neden olan doğa olayına yani kuraklığa dönüşmektedir (URL-2, 2024). Ancak bir bölgenin kurak olması ile kuraklık arasında farklılık vardır. Kuraklık bölge ikliminden bağımsız olarak bir dönem boyunca mevcut su miktarındaki azalma olarak tanımlanabilir. Kurak ise kuraklık görülmeyen dönemde dahi olsa su miktarının sürekli olarak az olmasını ifade etmektedir (Wilhite, 1992; Mishra & Singh, 2010).

Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından yapılan sınıflandırmada ülkemiz kuraklık riski olan 76 ülke arasında yer almaktadır. Ülkemizde ortalama her altı yılda bir orta şiddetli kuraklık ve her on sekiz yılda bir şiddetli kuraklık yaşanmaktadır. Son yıllarda kuraklığın frekansında ve şiddetinde artış eğiliminin olduğu görülmektedir (Türkeş vd., 2009; Unal vd., 2012; Spinoni vd., 2015; Caloiero vd., 2018; URL-3, 2023). Kuraklıklar ile birlikte artan nüfus, sanayileşme, tarım, evsel kullanım ve enerji üretimi nedeniyle suya olan talep artmaya devam etmekte ve belirli bir zaman sonra mevcut suyu yetersiz kalmasıyla kıtlık riski ortaya çıkmaktadır (Srinivasan vd., 2013). 2050'e kadar dünya nüfusunun yaklaşık yarısının su kıtlığı çekeceği öngörülmektedir (Liu vd., 2017; He vd., 2021).

Dünya üzerinde su tüketiminin yaklaşık %70'i tarımda kullanırken bu oran ülkemizde %77'dir (Vörösmarty vd., 2010; URL-4, 2023). Enerji ve tarımsal üretim için su kullanımının yüzdesi 2035 yılına kadar büyük ölçüde artacaktır (Jewell, 2011). Bununla birlikte ülkemizde kişi başına düşen su miktarı 2000 yılında 1.652 m³ iken 2022 yılında 1.322 m³'e kadar düşmüştür (URL-4 ve URL-5, 2023). Ülkemiz bu değerler ile su stresi yaşanan bir ülke konumundadır. Kişi başına düşen su miktarındaki düşüş eğilimi devam edip, bu değer 1.000 m³'ün altına indiğinde ülkemiz su fakiri ülke konumuna düşecektir. Bu nedenle suyu etkin ve verimli kullanmak için sürdürülebilir su kaynakları yönetimi oldukça önemlidir.

Su riski, su ile ilgili sorunların ortaya çıkma olasılığını ifade eder. Örnek olarak su kıtlığı, su stresi, sel, altyapının bozulması ve kuraklık verilebilir (URL-6, 2024). URL-7 (2024) göre, hassasiyet, insan refahını tehdit eden fiziksel tehlikelere maruz kalma ile insanların ve toplumların bu tehlikelerle başa çıkma kapasitesi arasındaki ilişki olarak tanımlanabilir. Tehlikeler, sosyal ve fiziksel süreçlerin bir kombinasyonundan kaynaklanabilir (Sullivan, 2011). Su kıtlığı, herhangi bir nedenden dolayı suyun sınırlı olduğu durumları ifade ederken; su stresi ise suyun kullanımında zorluk yaşanmasına neden olan erişim veya mobilizasyon sorunlarıyla ilişkilidir. Su stresi genellikle kullanılabilirlik oranıyla ilişkilendirilir ve %40'tan büyük değerler, yüksek su stresinin varlığını gösterir. Bu sorunlar, su altyapısı eksikliği, akış kontrolünde sorunlar veya maliyetler gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Su güvenliği, bir nüfusun geçim kaynaklarını, insan refahını ve sosyo-ekonomik kalkınmayı sürdürmek, su kaynaklı kirliliğe ve suyla ilgili felaketlere karşı koruma sağlamak ve barış ve siyasi istikrar ortamında ekosistemleri korumak için yeterli miktarda kabul edilebilir kalitede suya sürdürülebilir erişimini koruma kapasitesidir. Bu durumda, suyla ilişkili risklerin kabul edilebilir seviyelerde olması önemlidir (Bakker, 2012; Rodrigues vd., 2014, URL-8, 2024). Ulusal su güvenliği politikaları sadece su kaynaklarının mevcudiyetini değil, aynı zamanda gıda, enerji ve iklim gibi diğer temel toplumsal ihtiyaçlarla karşılıklı bağımlılığını da dikkate almalı ve ilgili aktörler arasında adil bir dağılım sağlamalıdır (Zeitoun, 2011). Su güvenliğinin seviyesi ve kapsamı, toplumsal ihtiyaçlar, ekosistem işleyişi ve hidroklimatolojik koşullar arasındaki etkileşimlerle karakterize edilir (Scott vd., 2013). Bu etkileşimler, su güvenliği, insan güvenliği ve sürdürülebilir kalkınma için hayati öneme sahiptir. Bu nedenlerle su güvenliği çalışmalarının önemi ön plana çıkmaktadır.

Tatlı su kaynaklarını mavi, yeşil ve gri su olarak sınıflandırarak su güvenliğini ele almak su kaynakları yönetimi için oldukça faydalıdır (Schneider, 2013). Mavi su kara

yüzeyinden veya altından akarak akiferlerde, göllerde ve rezervuarlarda depolanırken, yeşil su toprağa sızarak toprak nemi haline gelen veya geçici olarak toprak veya bitki örtüsünün üzerinde kalan yağış kısmını ifade etmektedir (Falkenmark & Rockström, 2006; Rockström vd., 2009; Rodrigues vd., 2014). Gri su, üretilen mal veya hizmetlerin su kalitesini olumsuz etkilemesine sebep olabilir. Bu terim, bir akarsuyun doğal su kalitesine yaklaşmak ve kimyasal kirliliği düzeltebilmek için ekstra temiz su miktarını tanımlar (Hoekstra vd., 2011; Aldaya vd., 2020; Veetil vd., 2022). İnsan faaliyetleri tarafından mavi ve yeşil su türlerinin her birinin tüketimi, Hoekstra vd. (2011) tarafından geliştirilen su ayak izi kavramına dahil edilmiştir. Bu kavrama göre mavi su ayak izi yüzey suları ve yeraltı sularından tüketimken yeşil su ayak izi bitki ve orman alanlarından buharlaşma ve terleme yoluyla tüketilen sudur.

Su kullanımının etkilerini anlamak için, mavi su ve yeşil su ayak izi ögeleri kullanılabilir. Bu ögeler, çevreye zarar vermeden tatlı su kaynaklarının mevcut durumlarıyla ilişkilendirilerek, çevresel sürdürülebilirlik ve insan faaliyetleri arasındaki bağlantıları değerlendirmeyi sağlar. Bu şekilde, kurak dönemler gibi yılın farklı zamanları ve alt havzalar gibi konumlar belirlenerek, su çatışmaları ve sorunlarının ortaya çıkma olasılığı daha yüksek olan dönemlerin ve bölgelerin tespiti kolaylaştırılır. Bu değerlendirme, su kaynaklarının yönetimi ve sürdürülebilir kullanımı bakımından önemli bir adımdır (Hoekstra vd., 2011). Eğer tarihsel arazi ve su kullanım alışkanlıkları devam ederse, dünyanın büyük bir bölümünde ekosistemlerin tatlı su hizmetlerini sağlama ve destekleme vb. hizmetlerini sürdürme kapasitesi ciddi şekilde zayıflamış durumda olacaktır (Vörösmarty vd., 2005). Bu nedenle su hassasiyeti ve risk değerlendirmesi su güvenliğinin kritik parçaları olarak tanımlanmıştır (Bakker, 2012). Su hassasiyeti değerlendirmeleri, su kaynaklarının mevcut koşullarda karşılayabileceği su kullanım ihtiyaçlarını öngörerek su güvenliği açısından olası zayıflıkların belirlenmesine yardımcı olabilir. Bu değerlendirmeler, su stresi altındaki su kaynaklarının kapasitesini analiz ederek, su talebinin karşılanma potansiyelini değerlendirir ve böylece su güvenliğindeki potansiyel zayıflıkların belirlenmesine katkıda bulunmaktadır (Padowski & Jawitz, 2012). Bu nedenle su güvenliği değerlendirmesiyle ilgili kavramları bütünleştiren ve insan ve su ekosistemi güvenliğine yönelik suyla ilgili birincil tehditlerin teşhis edilmesine yardımcı olabilecek mavi ve yeşil su kıtlığı ve hassasiyeti temelli bir su güvenliği hesaplama süreci Rodrigues vd. (2014) tarafından önerilmiştir.

Rodrigues vd. (2014) mavi ve yeşil su temelli veya benzer su güvenliği çalışmaları dünyanın farklı bölgelerinde, örneğin Amerika (Veetil & Mishra, 2018), Brezilya (Rodrigues vd., 2014), Çin'de (Xie vd., 2020) gerçekleştirilmesine rağmen yarı kurak

Akdeniz iklim kuşağındaki bölgelerde yeterince araştırma yapılmamıştır. Öte yandan araştırmalar (Schuol vd., 2008; Cuceloglu vd., 2017; Akbas vd., 2020) genellikle mavi su mevcudiyeti, yeşil su mevcudiyeti ve kıtlığı üzerine yoğunlaşmasına rağmen hassasiyet ve mavi su kıtlığı üzerine yapılan çalışmalar daha sınırlıdır (Rodrigues vd., 2014; Veetil & Mishra, 2016).

Su güvenliğine olan baskı sadece insanlar veya sektörel bazlı olmayıp iklim değişikliği etkileri ile daha da artacağı öngörülmektedir (Veetil vd., 2022). Ancak iklim değişikliğini anlamak için öncelikle hava durumu, iklim, iklim değişkenliği ve iklim değişikliği arasındaki farkların bilinmesi gerekir. Belirli atmosferin bir bölgedeki ve andaki kısa zaman ölçeğinde (gün, ay, mevsim gibi) değişen bulutluluk, yağış, rüzgar, sıcaklık, nem ve görüş durumu gibi özellikler barındırmasına olayına hava durumu denir (URL-9, 2023). Uzun zaman içerisinde gerçekleşen ortalama ve uç hava koşullarının tümü iklimi oluşturmaktadır. Ayrıca bilinmesi gereken bir diğer kavram ise iklim değişkenliğidir. İklimin özelliklerinin ortalamadan sapma şeklini ifade eder. İklim değişkenliği, hava ve okyanus dolaşımındaki doğal ve bazen periyodik değişiklikler, volkanik patlamalar ve diğer faktörler nedeniyle oluşur (Türkeş, 2008; URL-10, 2023). Ancak iklimin ortalamasında veya değişkenliğinde uzun süre (en az 30 yıl) devam eden istatistiksel olarak anlamlı değişiklikler ise iklim değişikliği olarak ortaya çıkmaktadır (Türkeş, 2008; Nacar, 2020). Taşıtların, tarım alanlarında makineleşmenin, fosil yakıt kullanımının ve sanayi üretiminin artması, ormansızlaşma ve arazi kullanımındaki değişiklikler gibi insan kaynaklı etkiler sonucu; sera gazı (örneğin; karbondioksit, metan, azotdioksit) etkisi artmaktadır. Sera gazı etkisinin artması, yerküredeki enerji dengesine ilave ısınımsal zorlamayla ozon tabakasının incelmeye ve yerkürenin ısınmasına sebep olmaktadır (Türkeş, 2008; Dabanlı, 2017). Bu ısınmaya ek olarak insan nüfusunun artması ile beslenme ve barınma ihtiyacında artış ve bu artışı gidermek amacı ile ormanların tarım arazilerine ve yerleşim bölgelerine dönüştürülmesi, akarsu güzergâhların değiştirilmesi gibi insan kaynaklı değişimler iklim değişikliğini oluşturmakta, artırmakta ve su kaynaklarının etkilenmesine sebep olmaktadır (Şen vd., 2010; Şen, 2015).

İklim değişikliğini önlemek, hızını ve etkilerini azaltmak ve etkilerine karşı uyum sağlamak amacıyla dünya üzerinde çeşitli çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmaların başında Birleşmiş Milletlerin alt gruplarından olan Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) ve WMO'nun iklim değişikliğinin olası risklerini ölçmek, belirlemek ve yorumlamak için Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) 1988 yılında İsviçre'nin Cenevre kentinde kurulmuştur (URL-9, 2023). IPCC kuruluşu haricinde beş kez yapılmış ve

altıncısının ise 2023 yılı mart ayında panel sentez raporu sunumu yapılmıştır (IPCC, 2023). Genel olarak panel çıktıları dikkate alındığında 1850-1900 dönemine kıyasla 2011-2020 döneminde 1,1 °C'lik bir sıcaklık artışı yaşandığı ve yüzyılın sonuna kadar 2 °C'yi aşmasının kaçınılmaz olduğu düşünülmektedir (IPCC, 2013, 2021, 2023; URL-9, 2023). Bu ısınmayla birlikte doğrudan veya dolaylı olarak insan kaynaklı bozulan orman örtüsünün eski haline gelmesi zorlaşacak, düzensiz yağışlar ve sıcaklıklar sonucu taşkın, kuraklık, orman yangını ve sıcak hava dalgası gibi aşırı hidrometeorolojik olayların bölgeden bölgeye değişen miktarlarda sıklıklarının, şiddetinin ve süresinin artarak değişmesi ile birlikte su miktarı ve kalitesinde de değişimlere yol açacağı beklenmektedir (Şen vd., 2010; Şen, 2015).

Sıcaklık artışlarının insan kaynaklı iklim değişikliğine sebep olduğu artık bilim insanları tarafından vurgulanmaktadır (IPCC, 2013, 2021, 2023; Şen, 2015; Nacar, 2020). Ancak sıcaklık artışını kontrol etmek, riskleri azaltmak ve oluşacak yeni düzene karşı uyum sağlamak için geleceğe yönelik olası senaryolar ile iklimsel projeksiyonlara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle dünya üzerinde farklı kurumlar tarafından iklim modellemeleri yapılmaktadır (URL-9, 2023; Nacar, 2020). Atmosferde gerçekleşen hava olayları ve iklim parametreleri aralarındaki ilişkiler farklı zaman, konum ve basınç seviyelerinde matematiksel olarak modellenerek Genel Dolaşım Modeli (GDM) oluşturulmaktadır (Şen vd., 2010; Dabanlı, 2017; Nacar, 2020). 200-600 km çözünürlüklü sayısal ağlara sahip GDM'ler küresel iklimi genel olarak temsil etme kabiliyetine sahipken, topoğrafya ve bölgeyi etkileyen farklı hava olayları nedeniyle bölgesel iklimi temsil edememektedir. Yani bölgesel ölçekte iklimi ve hidrolojik döngüyü modellemek için GDM'ler uygun değildir. Bu nedenle dinamik ve istatistiksel ölçek indirgeme (İÖİ) yöntemleri geliştirilmiştir (Fowler vd., 2007). Dinamik ölçek indirgeme yöntemi belirli bir bölgesel fiziksel ve atmosferik süreçleri sayısal modelleme ile yapılmasıdır. Ancak fiziksel parametrelerin hesaplanması yüksek yoğunluklu işlemler gerektirdiği ve dolayısıyla uzun zaman almasından kaynaklı ölçek indirgeme yöntemi olarak daha az tercih edilmektedir. İÖİ ise nokta ve bölge ölçekli iklim değişkenleri elde edilebilmesi; farklı bölgelere kolaylıkla taşınabilmesi; standart ve kabul edilen istatistiksel süreçlere dahil edilebilmesi; yapay zeka, makine öğrenmesi vb. en yeni yöntemler ile kullanılabilmesi ve gözlemleri doğrudan yöntemin içine dahil edilebilmesi nedeniyle önceki çalışmalarda sıklıkla tercih edilmiştir (Fowler vd., 2007; Ekstrom vd., 2015; Okkan & Inan, 2015). İÖİ yöntemleri ise üçe ayrılmaktadır; 1) Hava durumu benzeşim modelleri; burada ortalama deniz seviyesi basıncı ve diğer atmosferik alanlar (örneğin rüzgarlar ve nem) ile yerel tahminler tarafından tanımlanan sinoptik hava durumu modelleri

arasında geliştirilen istatistiksel ilişkileri kullanır; 2) Hava durumu üreticileri; bunlar gerçekçi görünen ancak sentetik hava durumu değişkenleri dizileri üreten istatistiksel modellerdir (Ekstrom vd., 2015); 3) Transfer fonksiyon yöntemi; bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında istatistiksel ve kara kutu modeller kurmaktadır. Diğer İÖİ yöntemlerinden farkı, durağanlık varsayımından kaçınmayı sağlayan, jeopotansiyel, nem vb. iklimsel parametreleri Akdeniz iklim kuşağı gibi yarı kurak bölgelerde ve kurak dönemlerde ekstrem yağışların oluşumunda önemli rol oynayan parametreleri dikkate almasıyla bölgesel iklimi temsil etme kabiliyetinin yüksek olmasıdır (Wilby vd., 1998; Ekstrom vd., 2015; Keupp vd., 2019; Song vd., 2022; Şan vd., 2023). Bu nedenlerle transfer fonksiyon yöntemi iklim değişikliğinin etkilerinin bölgesel ve noktasal ölçekte incelenmesi için sıklıkla tercih edilmektedir (Nasseri vd., 2013; Bettolli & Penalba, 2018; Nacar vd., 2022a).

Transfer fonksiyon yöntemi İÖİ için kullanılırken yeniden analiz verilerinden yararlanılır. Küresel ölçekte meteoroloji gözlem istasyonları, uydu verileri, ülkelerin ulusal arşivlerinde bulunan küresel atmosfer analiz sonuçları ve hava tahmin modelleriyle üretilmiş yeniden analiz veri setleri oluşturur. JRA-55, MERRA, ERA-Interim ($0,75^\circ \times 0,75^\circ$) ve NCEP/NCAR ($2,5^\circ \times 2,5^\circ$) gibi birçok yeniden analiz veri seti olmasına rağmen, İÖİ çalışmalarında genellikle yerel atmosferik değişkenleri tahmin etmek için ERA-Interim'in geliştirilmiş hali olan ERA5 kullanılmaktadır. ERA5 2019 yılında yüksek çözünürlüklü bir yeniden analiz veri seti olarak ortaya çıkmıştır (Hersbach vd., 2020; Şan vd., 2023). Ancak yeni olmasından kaynaklı olarak ERA5 veri seti ile yapılan çalışmalar dünyada ve ülkemizde oldukça sınırlıdır (Emmanouil vd., 2021; Horton, 2022; Nacar vd., 2022b). Geçmiş İÖİ çalışmalarındaki ERA5 veri setinin performansı özellikle günlük zaman ölçeğindeki incelemeleri oldukça kısıtlıdır (Şan vd., 2023).

İklimsel parametrelerin ve süreçlerin içerdiği belirsizlikler nedeniyle iklimi tam manasıyla tanımlamak matematiksel olarak mümkün olmadığı için senaryolara ihtiyaç duyulmaktadır (Akçakaya vd., 2013). Senaryolar, gelecekle ilgili bir tahminden ziyade insan faaliyetlerinin etkisiyle oluşabilecek kötümser ile iyimser yaklaşımların arasındaki alternatiflerin modellenmesidir. Bu senaryolar sera gazlarının (karbondioksit, metan vb.) salım düzeyleri dikkate alınarak oluşturulmaktadır. Farklı salım düzeyleri ise ülkelerin ekonomik gelişim durumları, nüfus, arazi kullanımı, teknolojik gelişmeler, yenilenebilir enerji kaynakları ile fosil yakıt kullanımları ve diğer parametreler dikkate alınarak oluşturulmaktadır (Akçakaya vd., 2013, 2015; Nacar, 2020; IPCC, 2021). Geçmiş çalışmalarda sıklıkla IPCC'nin 2013 yılında yayınladığı temsili konsantrasyon rotaları

(RCP) senaryoları kullanılmaktayken, bunun yerini IPCC'nin 2021 yılında yayınladığı sosyoekonomik rotalar (SSPs) senaryolar almıştır (IPCC, 2013, 2021; Nacar, 2020; Bağcı vd., 2021). SSP senaryoları 2016 yılından itibaren GDM'lerin içinde yer almış bu nedenle son zamanlarda sıklıkla tercih edilir olmuştur (O'Neill vd., 2016). Bölgesel veya noktasal ölçeğe İÖİ uygulamasıyla SSP senaryoları ile geleceğe yönelik iklim parametrelerinin tahmin etme çalışmaları geçmiş çalışmalarda olmasına rağmen (Zhao vd., 2021; Oruc, 2022; Seker & Gumus, 2022; Gumus vd., 2023a) ülkemizde veya dünyada özellikle de günlük ölçekte İÖİ yöntemlerinden transfer fonksiyonu kullanarak yapılan çalışma oldukça azdır (Baghanam vd., 2022; Zhang vd., 2022; Me vd., 2022).

1.2. Geçmişte Yapılmış Çalışmalar

1.2.1. İklim Değişikliği Çalışmaları

Ülkemiz, Akdeniz iklim kuşağında olup iklim değişikliğinin olumsuz etkilerinin yoğun şekilde hissedildiği ve bu olumsuz etkilerin şiddetinin artacağı belirtilmektedir (URL-9, 2023; Dabanlı, 2017; Nacar, 2020; Tuel & Eltahir, 2020). Bu nedenle ülkemizde iklim değişikliği üzerine yapılan ülke ve havza bazlı çalışmalar son dönemlerde bir ivme kazanmıştır.

Ülke çapında yapılan ilk kapsamlı çalışmalara göre (Apak & Ubay, 2007; Demir vd., 2008a, 2008b) 2000 yılında yayınlanan Emisyon Senaryolarına İlişkin Özel Rapor (SRES) A2 kötümser senaryosunu dikkate alarak yüzyılın sonuna doğru yağışta Ege ve Akdeniz kıyılarında azalma ve Karadeniz kıyılarında artış olacağı, sıcaklıklarda ise kış aylarında doğu kesimlerde 4-6 °C, yaz aylarında ise 6-7 °C ve yıllık ortalama değerlerde 2-3 °C artış olacağı öngörülmüştür. Bu çalışmalara göre daha güncel kapsamlı çalışma Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından yapılan 5. Birleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi'nde (CMIP5) bulunan HadGEM2-ES, MPI-ESMMR ve GFDLESM2M GDM'lerini kullanarak RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında dinamik ölçek indirgeme sonuçlarına göre sıcaklıklarda ciddi artışlar olacağı öngörülmüştür. Senaryolara göre 1,5-3,6 °C arasında değişen artışlar olacağı öngörülmüştür. Akdeniz ve Güney Doğu Anadolu bölgelerinin diğerlerine göre daha fazla etkileneceği öngörülmüştür. Yağışlarda ise Akdeniz'e dökülen akarsuların bulunduğu havzalarda önemli miktarlarda değişiklikler olacağı belirlenmiştir (URL-9, 2023). Bununla birlikte, Bağcı vd. (2021) tarafından herhangi bir ölçek indirgeme

yapılmadan ülkemizi kapsayan çalışmaya göre gözlenen CMIP6’da bulunan GDM’ler yağış ve sıcaklık verilerini CMIP5’deki GDM’lerden daha yüksek performansla tahmin etmektedir. En kötümser SSP senaryosu dikkate alarak yıllık ortalama sıcaklıklarda 1986-2005 dönemine göre yakın gelecekte 1,5 ve uzak gelecekte 4,4 °C’lik bir artış beklenirken yıllık toplam yağışlarda yakın gelecekte 20 mm ve uzak gelecekte 95 mm azalma öngörüldüğü tespit edilmiştir. Ayrıca yaz mevsimlerinin sonbahar mevsimlerine doğru uzadığı, Ege ve Akdeniz’de diğer bölgelere göre daha fazla kuraklık beklendiği ve en yüksek yağış artışının Doğu Karadeniz’de olmasının öngörüldüğü belirtilmiştir.

Havza ölçeğinde yapılan çalışmalar incelendiğinde, Tahtalı Barajı Havzası’nda (İzmir) transfer fonksiyon metodunu kullanılarak 12 adet GDM’nin SRES senaryolarında yağışların %3-13 arasında azalabileceği, sıcaklıkların 1,5-2,1 °C arasında artabileceği ve akımların %9-22 arasında azalabileceği (Okkan, 2013), Gediz Havzası’nda transfer fonksiyon metodunu kullanılarak 12 adet GDM’nin RCP senaryolarında 1980-2005 dönemine kıyasla aylık ortalama yağışlarda %2-20 azalma, sıcaklıklarda 2,7-5,3 °C artış ve bunun sonucunda %14-45 arasında barajlarda su açıkları olacağı (Okkan, 2016), Akarçay Havzası’nda ölçek indirgenmiş SRES senaryolarında yağışlarda değişim olmayıp sıcaklıklar yaklaşık 0,5 °C artış olacağı (Dabanlı, 2017), Susurluk Havzası’nda dinamik ölçek indirgenmiş hazır MPI-ESMMR GDM’sinin verilerini kullanarak RCP senaryolarında 1971-2000 dönemine kıyasla yağış, toprak nemi, yüzeysel akış, akım, sızma, yeraltı suyu, yüzey altı akışı ve su dengesi gibi parametrelerin azalışta olduğu (Akbaş, 2018), Doğu Karadeniz Havzası’nda transfer fonksiyon metodunu kullanılarak dört adet GDM’nin RCP senaryolarında 1981-2010 dönemine kıyasla kıyı bölgelerinde ortalama yağışlarda önemli miktarda artış, sıcaklıklarda 2,0-3,0 °C artış ve kıyı bölgelerinde ortalama yağışlarda önemli miktarda düşüş, sıcaklıklarda 2,5-3,5 °C artış olabileceği, Akdeniz Bölgesi’nde transfer fonksiyon metodunu kullanılarak 22 adet GDM’nin SSP senaryolarında 1979-2015 dönemine kıyasla aylık yağışların %15-20 arasında azalabileceği, sıcaklıkların 1,0-3,1 °C arasında artabileceği ve akımların %9-22 arasında azalabileceği (Gumus vd., 2023b) öngörülmüştür. Ancak yapılan çalışmalarda neredeyse tamamına yakını geçmiş senaryo verilerini kullanarak aylık veriler üzerinde ve çoğunlukla tek tip iklime sahip bölgelerde gelecek durum üzerine durulmuştur. Bunun yanında Susurluk Havzası gibi yarı kurak Akdeniz iklimi ve dağ iklimine sahip bölgedeki aylık değerlerin yanında günlük yağış ve maksimum-minimum sıcaklıkların gelecekteki olası durumlarının incelenmesi taşkın ve kuraklık gibi aşırı olayların

anlaşılmasına ve detaylı su kaynakları ve havza yönetimi planlamaları yapılmasına olanak sağlayacaktır.

1.2.2. Su Güvenliği Çalışmaları

Türkiye genel olarak su varlığı açısından rahat bir konumda olduğu düşünülse de aslında su stresi yaşan bir ülkedir (URL-4 ve URL-5, 2023). Karşılı (2011) tarafından yapılan çalışmaya göre Marmara ve Küçük Menderes havzaları mutlak su kıtlığı sınıfında, Sakarya Havzası su kıtlığı sınıfında yer almakta iken Burdur, Çoruh, Meriç-Ergene, Batı Akdeniz ve Aras havzaları yeterli suya sahip olarak değerlendirilmiştir. Aydın vd. (2017) tarafından yapılan çalışmaya göre ülke nüfusunun yaklaşık %40'nın yaşadığı Marmara, Sakarya ve Küçük Menderes havzaları sırasıyla mutlak su kıtlığı, su sıkıntısı ve su kıtlığı sınıfında yer alırken diğer havzalar su sıkıntısı yok olarak değerlendirilmiştir. Ödensoy (2017) tarafından yapılan çalışmada 2050 yılı için SSP senaryoları kullanılarak Büyük Menderes Havzası'nda farklı sektörler bazında su kıtlığı risk haritaları oluşturulmuştur. Akbaş vd. (2020) tarafından Susurluk Havzası'nda yapılan çalışmaya göre 1970-2000 döneminde kişi başına düşen yıllık su miktarı yaklaşık 2.200 m³ iken RCP'nin kötümser senaryosuna göre yüzyılın sonunda bu değer 500 m³ olacağı hesaplanmıştır. Coşkun (2022) tarafından yapılan çalışmada Bursa ili kent merkezi baz alınarak kişi başına düşen aylık su miktarı 11.479 L iken yakın gelecekte 5.319-5.514 L ve uzak gelecekte 3.770-3.830 L arasında olacağı hesaplanmıştır. Yapılan çalışmalara bakıldığında çoğunlukla kişi başına düşen su miktarı üzerinden su kıtlığının hesaplandığı fakat su güvenliğinin önemli parametresi olan hassasiyet ile ilgili inceleme yapılmadığı görülmektedir.

Mavi ve yeşil su tabanlı su güvenliği çalışmalarına bakıldığında, Cüceloğlu (2019) RCP senaryoları altında beş adet GDM'nin verilerine yanlılık düzeltme yaparak İstanbul'da mavi ve yeşil su mevcudiyeti, yeşil su akışının gelecekteki durumlarını incelemiştir. Referans dönemde mavi su mevcudiyeti 3,5 milyar m³/yıl, yeşil su mevcudiyeti 0,7 milyar m³/yıl, yeşil su akışı yani gerçek buharlaşma ve terleme miktarı 2,9 milyar m³/yıl belirlenmişken mavi su mevcudiyetinde yakın gelecekte %2-12 arasında azalma ve uzak gelecekte %12-18 arasında azalma hesaplanmıştır. Yine Akbaş vd. (2020) Susurluk Havzası'nda dinamik ölçek indirgenmiş hazır MPI-ESMMR GDM'sinin verilerini kullanarak RCP senaryolarında 1971-2000 dönemine kıyasla mavi su mevcudiyetinde önemli miktarda azalma ancak yeşil su akışında önemli değişim olmadığını belirlemiştir.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde mavi ve yeşil su mevcudiyeti ve yeşil su akışıyla ilgili incelemeler yapıldığı görülmektedir. Bunun yanında su güvenliğinin önemli parametreleri olan su kıtlığı ve hassasiyetine iklim değişikliğinin olası etkilerinin incelenmediği görülmektedir.

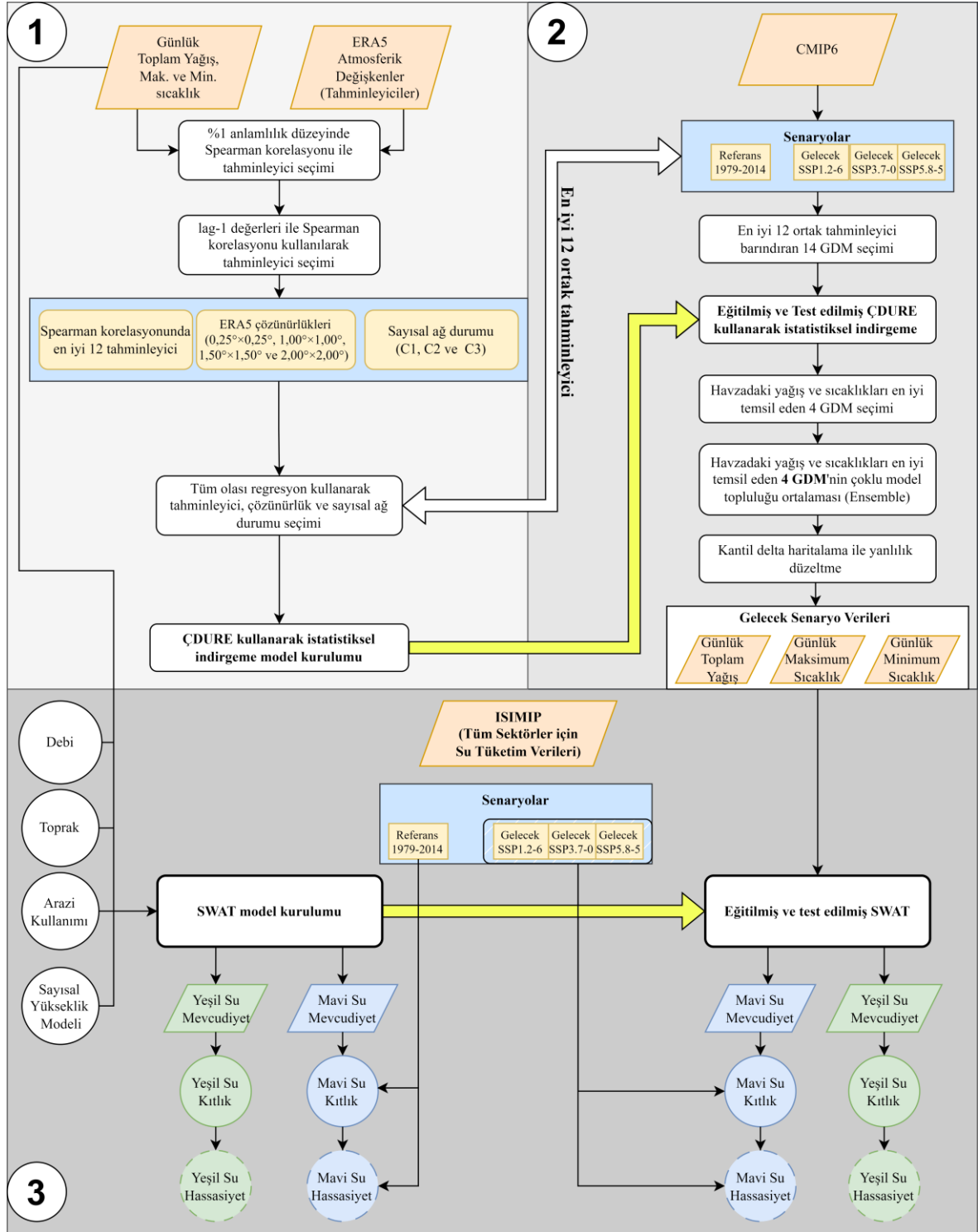
1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, iklim değişikliğinin Türkiye'nin en yoğun nüfuslarından birine sahip yarı kurak Akdeniz iklimi ile dağ ikliminin hâkim olduğu Susurluk Havzası'nın (Peel vd., 2007; Ozturk vd., 2017; Akbas vd., 2020) mavi ve yeşil su tabanlı su güvenliğine olası etkilerinin incelenmesidir.

İlk aşamada gelecek üç senaryo (SSP1-2.6, SSP3-7.0 ve SSP5-8.5) altında günlük toplam yağış, minimum ve maksimum sıcaklık verilerinin üretimi için 1979-2018 dönemini kapsayan ve homojen veriye sahip dokuz adet meteoroloji gözlem istasyonunda İÖİ modelleri kurulumu gerçekleştirilmiştir. İÖİ modellerinin kurulumundan önce ERA5 veri setinde yağış ve sıcaklık parametrelerini etkileyen atmosferik değişkenlerin (tahminleyiciler) seçimi spearman korelasyonu ile gerçekleştirildikten sonra tahminleyicileri bir önceki gün değerleri (lag-1) ile korelasyonu incelenerek 12 en iyi tahminleyici belirlenmiştir. İstasyonların etrafındaki sayısal ağ sayılarının ortalaması durumları ve yeniden analiz veri setinin çözünürlük durumları incelenerek optimum durumlar tüm olası regresyon yöntemiyle belirlenmiştir. Ardından her bir istasyonun yağış ve sıcaklık parametreleri için İÖİ modelleri çok değişkenli uyarlamalı regresyon eğrileri (ÇDURE) yöntemini kullanarak oluşturulmuştur.

İkinci aşamada yağış ve sıcaklık parametrelerini etkileyen atmosferik değişkenleri içinde barındıran GDM'lerin geçmiş ve gelecek dönem senaryo verileri elde edilmiştir. Oluşturulan İÖİ modellerine GDM'lerin geçmiş dönem senaryo verileri girilerek yağış ve sıcaklık değerleri üretilmiştir. Havzadaki yağış ve sıcaklık verilerini en iyi temsil eden GDM'ler belirlenmiş ve gelecek senaryoların yağış ve sıcaklık verileri üretilmiştir. Ardından temsil kabiliyeti yüksek GDM'lerin geçmiş ve gelecek senaryo verilerinin çoklu model topluluğu ortalaması (ensemble) hesaplanmıştır. Olası yanlışlıkları gidermek amacıyla kantil delta haritalama (KDH, Quantile Delta Mapping-QDM) yöntemi geçmiş ve gelecek senaryolar için birlikte kullanılmıştır. Böylelikle her bir istasyon ve parametre için bir geçmiş ve dört gelecek senaryo verisi üretilmiştir.

Üçüncü aşamada; havzadaki su güvenliğinin önemli parametreleri olan mavi ve yeşil su mevcudiyeti, kıtlığı ve hassasiyetinin zamansal-alansal dağılım olarak hesaplanması; gözlem yağış ve sıcaklık verilerinin girdi olarak kullanıldığı Toprak ve Su Değerlendirme Aracı (SWAT) modeli kurularak yapılmıştır. Üretilen gelecek senaryo verileri SWAT modeline girdi olarak verilerek gelecek su güvenliği parametrelerinin zamansal-alansal dağılımı elde edilmiştir. Mavi su kıtlığı ve hassasiyeti için Sektörler Arası Etki Modeli Karşılaştırma Projesi (ISIMIP) kapsamında oluşturulmuş geçmiş ve gelecek senaryo su tüketim verileri temin edilmiş ve su güvenliği parametreleri hesaplanmıştır. Böylelikle Susurluk Havzası'nda yağış, sıcaklık ve su güvenliğinin geçmişe göre gelecek senaryolar altındaki değişimleri belirlenmiş olup, yerel yöneticiler ve karar alıcılar için etkin su kaynakları ve havza yönetimi hazırlanırken veya güncellenirken dikkate alınması gereken kritik konular ve süreçler belirlenmiştir. Çalışmanın akış şeması genel hatlarıyla çizilmiş olup Şekil 1'de verilmektedir.

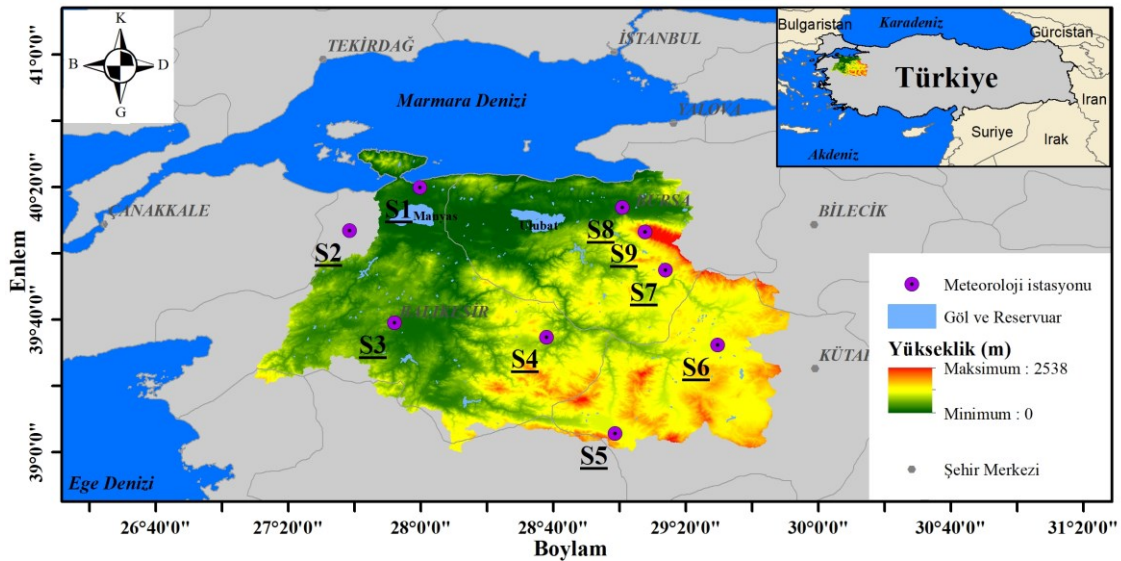


Şekil 1. Çalışmanın akış şeması

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. Çalışma Alanı

Susurluk Havzası Türkiye'nin kuzeybatısında 39°-40° enlemleri ile 27°-30° boylamları arasında yer almaktadır (Şekil 2). Havza alanı yaklaşık 24.000 km² olup Türkiye'nin yaklaşık %3'nü kapsamaktadır (Körük vd., 2023). Daha çok doğu-batı yönünde uzanan dağ sisteminin görüldüğü havzada Marmara Bölgesi'ne ait en yüksek dağ olan Uludağ (2.538 m) bulunmaktadır. Havza güneyde Şaphane ve Simav dağları, batıda Madra ve Deliçal dağları; doğuda Murat, Gümeş, Yirce ve Uludağ; kuzeyde ise Karadağ ve Mudanya tepeleri ile Marmara Denizi tarafından sınırlanmıştır. Havzada genel olarak yüksek eğimli alanlar az olup %0-12 düz-orta eğim aralığındaki eğime sahip alanlar havzanın yaklaşık %68'ini kapsamaktadır (Aytekin, 2021). Havza; Kocaçay, Mustafakemalpaşa, Nilüfer ve Simav gibi önemli akarsu alt havzalarını içermektedir. Balıkesir, Bursa ve Kütahya sırasıyla havzanın yaklaşık %44,4, %29,7 ve %24,2'sini kapsarken; geri kalan küçük kısmını Manisa, Çanakkale, Bilecik ve İzmir oluşturmaktadır (URL-11, 2024). Türkiye'nin uluslararası öneme sahip 14 Ramsar alanından ikisi olan Uluabat ve Manyas gölleri havzada yer almaktadır (URL-12, 2024).



Şekil 2. Çalışmada kullanılan meteoroloji gözlem istasyonları, Susurluk Havzası

Kışları yağışlı ve yazları sıcak yarı kurak olan Akdeniz iklimi etkisi altında bulunan havzada Uludağ'ın yer aldığı Nilüfer Alt Havzası'nın bir bölümünde dağ iklimi hakimdir (Peel vd., 2007; Ozturk vd., 2017). Havzanın yıllık toplam yağış ortalaması 640 mm ve yıllık ortalama sıcaklık 12 °C'dir (Şan vd., 2023). Susurluk Havzası yıllık 6,08 milyar m³ su potansiyeline, 5,43 km³ yıllık ortalama akışa ve yıllık ortalama 7,2 L/s/km² verime sahiptir. Havzada 22 adet yeraltı su kütlesi bulunmakta ve kullanılabilir yeraltı su kaynağı miktarı 712,79 hm³/yıl'dır. En büyük kullanılabilir yeraltı suyu kaynakları Nilüfer (255,23 hm³/yıl), Manyas-Uluabat (141,26 hm³/yıl) ve Balıkesir-Bigadiç-Kepsut (76,87 hm³/yıl) su kütleleridir (URL-13, 2024). En yüksek yağış ve yüzeysel akış değerleri kış aylarında olup bu değerler Atlantik'ten kaynaklanan ve kutupsal hava kütleleri tarafından oluşturulan orta enlem siklonik yağışlar ile bağlantılı olabilmektedir (Akbaş & Özdemir, 2018; Akbas vd., 2020). Ayrıca, Azor Yüksekleri ve daha az ölçüde Muson Alçakları gibi yüksek basınç sistemleriyle ilişkili düşük yağış ve yüksek buharlaşma nedeniyle en düşük akış değerleri yaz aylarında gözlenmektedir (Karaca vd., 2000; Tatlı vd., 2004). En yüksek akış seviyeleri, yüksek bölgelerdeki kar erimesinin bir sonucu olarak ilkbaharda gerçekleşmektedir (Akbas vd., 2020). Orman örtüsü, yüzeysel akış, kuraklık, mera alanları ve maksimum sıcaklık gibi parametreler en hassas göstergeler olup ve büyük bir kısmı iklim değişikliği riski altındadır (Aytakin, 2021).

Havzada içme, sulama ve enerji ihtiyaçları ile taşkın koruma amacıyla tamamlanmış veya devam eden çeşitli büyüklüklerde yaklaşık 65 baraj gölü bulunmaktadır (URL-14, 2020). Havzanın baskın arazi kullanım türleri kentsel (476 km²), tarım (9.997 km²) ve ormandır (10.876 km²). Türkiye'nin en yoğun madencilik faaliyetleri, havzanın büyük bir bölümünü kapsayan Balıkesir ve Bursa illerinde gerçekleşmektedir (URL-15, 2021). Tarımsal ve endüstriyel faaliyetlerin yoğun olduğu havzalardan biri olması, Türkiye'nin en yüksek nüfus yoğunluğuna ve madencilik faaliyetlerine sahip olması nedeniyle havza yüksek su tüketim baskısı altındadır (Akbas vd., 2020; Şan vd., 2023). Havzada taşkın sıklığı yüksek olmasına karşın özellikle düşük eğim nedeniyle ölüm oranları düşüktür (URL-11, 2024; Haltas vd., 2021). Ayrıca havza kara-deniz sıcaklık değişiminden etkilediği için iklim değişikliğine karşı oldukça hassas bir yapıya sahiptir (Komuscu & Celik, 2013).

2.2. Gözlem verileri

Susurluk Havzası'nı temsil edecek uzun yıllar günlük toplam yağış ile günlük maksimum ve minimum sıcaklık verilerine sahip dokuz adet meteoroloji gözlem istasyonu belirlenmiştir (Şekil 2). 1989-2018 dönemine ait veriler MGM'den temin edilmiştir. İstasyonlara ait temel bilgiler Tablo 1'de ve meteorolojik verilere ait yıllık temel istatistiki değerler Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 1. Susurluk Havzası'nda yer alan meteoroloji gözlem istasyonlarına ait konum bilgileri

İstasyonun bulunduğu il	İstasyon adı	İstasyon no	Rakım (m)	Enlem (°)	Boylam (°)
Balıkesir	Bandırma	S1	63	40,3315	27,9965
	Gönen	S2	37	40,1135	27,6426
	Balıkesir	S3	102	39,6500	27,8666
	Dursunbey	S4	637	39,5778	28,6322
Kütahya	Simav	S5	809	39,0925	28,9786
	Tavşanlı	S6	833	39,5384	29,4941
Bursa	Keles	S7	1063	39,9150	29,2313
	Bursa	S8	100	40,2308	29,0133
	Uludağ	S9	1877	40,1075	29,1290

Tablo 2. Susurluk Havzası'nda yer alan meteoroloji gözlem istasyonlarına ait yıllık temel istatistikler

İstasyon no	Parametre	Minimum	Maksimum	Ortalama	Standart sapma	Değişkenlik katsayısı	Çarpıklık	Basıklık
S1	Yağış (mm)	485,6	1051,2	715,6	155,8	0,22	0,64	2,59
S2		436,2	1136,1	679,9	141,1	0,21	1,25	4,92
S3		354,0	997,1	572,9	131,6	0,23	0,83	4,03
S4		434,0	824,0	557,6	95,8	0,17	0,67	2,74
S5		462,1	1347,4	740,4	203,6	0,27	1,02	3,52
S6		362,4	749,2	484,7	90,2	0,19	1,03	3,73
S7		538,9	1189,2	731,4	129,4	0,18	1,37	5,59
S8		510,8	1328,6	715,4	149,0	0,21	1,93	8,58
S9		967,2	2132,2	1449,5	234,5	0,16	0,74	3,52
S1	Maksimum Sıcaklık (°C)	33,3	43,1	36,9	2,4	0,07	0,81	3,07
S2		35,0	43,0	38,3	2,2	0,06	0,39	2,14
S3		37,0	43,2	39,6	1,8	0,05	0,26	2,12
S4		33,2	40,3	36,9	1,9	0,05	0,00	2,10
S5		32,3	38,8	36,0	1,7	0,05	-0,34	2,21
S6		32,7	42,2	37,8	2,1	0,06	-0,05	2,41
S7		29,6	41,0	34,0	2,3	0,07	0,35	3,68
S8		35,6	43,8	38,1	1,8	0,05	0,87	3,69
S9		23,5	32,6	26,8	2,0	0,07	0,64	3,63
S1	Minimum Sıcaklık (°C)	-14,0	-1,2	-6,0	2,7	-0,45	-0,71	3,61
S2		-15,1	-2,6	-7,7	2,8	-0,36	-0,42	2,98
S3		-18,8	-4,0	-8,2	3,2	-0,39	-1,47	5,60
S4		-16,0	-5,0	-10,2	2,5	-0,25	-0,16	2,25
S5		-21,7	-6,3	-12,0	3,3	-0,28	-0,58	3,29
S6		-22,5	-6,8	-15,3	3,6	-0,24	0,06	2,39
S7		-20,2	-6,4	-13,7	2,7	-0,20	0,17	3,16
S8		-16,4	-2,8	-8,1	3,5	-0,43	-0,53	2,47
S9		-22,2	-10,5	-16,9	2,3	-0,14	0,30	3,23

2.3. ERA5 Yeniden Analiz Verileri

ERA5 yeniden analiz veri seti 2006 yılında başlatılan ERA-Interim projesinin yerini almış ve 1950'den başlayarak günümüze kadar olan süreci kapsamaktadır. Asıl çözünürlüğü $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ olup atmosferik değişkenleri farklı zaman-konum-basınç seviyelerinde saatlik olarak barındırmaktadır. ERA-Interim için 80 km olan yatay çözünürlük değeri ERA5 için 31 km ile önemli ölçüde geliştirilmiştir (Hersbach vd., 2020). ERA5 verileri yağış ve sıcaklık değerleri için istasyon ölçeğindeki gözlem verilerini Türkiye ölçeğinde yüksek doğrulukta temsil edebilmesi (Bağcı vd., 2021; Nacar vd., 2022b; Yılmaz, 2023) ve yüksek çözünürlüklü olması nedeniyle bu çalışmada tercih edilmiştir. ERA5 yeniden analiz veri seti Avrupa Orta Vadeli Hava Tahminleri Merkezi (ECMWF) internet sitesinden (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>) temin edilmiştir. ERA5 veri setinin özgün çözünürlüğüne ek olarak, CMIP6'daki GDM'lere ait çözünürlüklerin ortalama ve

standart sapması dikkate alınarak $1,00^{\circ} \times 1,00^{\circ}$, $1,50^{\circ} \times 1,50^{\circ}$ ve $2,00^{\circ} \times 2,00^{\circ}$ olmak üzere üç farklı çözünürlükte yeniden analiz verileri elde edilmiş ve havza için en uygun veri çözünürlüğü belirlenmiştir.

2.4. Genel Dolaşım Modelleri

Atmosferde gerçekleşen hava olaylarını ve iklimsel süreçleri matematiksel olarak modellemek için GDM'ler dünyanın farklı bölge ve merkezlerinde geliştirilmektedir. GDM'ler fiziksel süreçleri zaman-konum-basınç seviyelerinde matematiksel denklemlerin sayısal çözümlemesi ile üretilirler. İklim alt bileşenlerinin etkileşimleri, belirli varsayımlar çerçevesinde model denklemlerine entegre edilmiştir. Kütlenin (süreklilik), momentumun (hareket) ve enerjinin (termodinamik) korunumu ve ideal gaz denklemlerine dayanan temel ilkelerdir (Dabanlı, 2017). Genel olarak geçmiş ve gelecek senaryo verilerini içinde barındıran düşük çözünürlüğe sahip yani 150-250 km'lik bir alanı temsil eden sayısal ağ boyutlarına sahiptir. Çalışma kapsamında CMIP6 veri tabanından (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>) geçmiş ve gelecek senaryo verilerini barındıran GDM'ler belirlenerek uygun olan 14 adet GDM temin edilmiştir.

2.5. Sosyo-Ekonomik Senaryolar

İklim değişikliğinin getireceği olası sorunlara karşı hazırlıklı olmak, önlem almak ve uyum sağlamak için Birleşmiş Milletler tarafından belirli aralıklarla yayımlanan IPCC raporlarında yeni senaryolar sunulmaktadır. Güncel senaryolar 2021 yılında "Fiziksel Bilimin Temeli" başlıklı raporda önerilmiş ve sentez raporu Mart 2023'te sunulmuştur (IPCC, 2021, 2023). Yeni sunulan rapora göre olası senaryoların süreci hakkındaki bilgiler aşağıdaki gibidir (O'Neill vd., 2017; Riahi vd., 2017):

SSP1-2.6: Dünya çevresel unsurlara saygı duyan ve giderek daha sürdürülebilir bir yaklaşımı benimseyen bir yol izlemektedir. Küresel ölçekte, yönetim anlayışında halkın katılımı ve etkisi yavaş yavaş artmakta, ekonomik büyüme hedefi yerine insan refahına odaklanma eğilimi gözlenmektedir. Bu süreçte, dünya çapında (hem ülkeler içinde hem de ülkeler arasında) eşitsizlik azalmaktadır. Ayrıca, tüketim alanında enerji ve kaynak kullanımında giderek azalma eğilimi gözlenmektedir. Bu durum, çevresel sürdürülebilirlik ve kaynak verimliliği hedeflerinin daha ön planda olduğunu ve daha dengeli bir küresel

kalkınma anlayışının benimsendiğini göstermektedir. Kısaca bu senaryo teknik olarak düşük sera gazı emisyonu (SGE) seviyelerine sahip sürdürülebilirlik politikası durumunu belirtir.

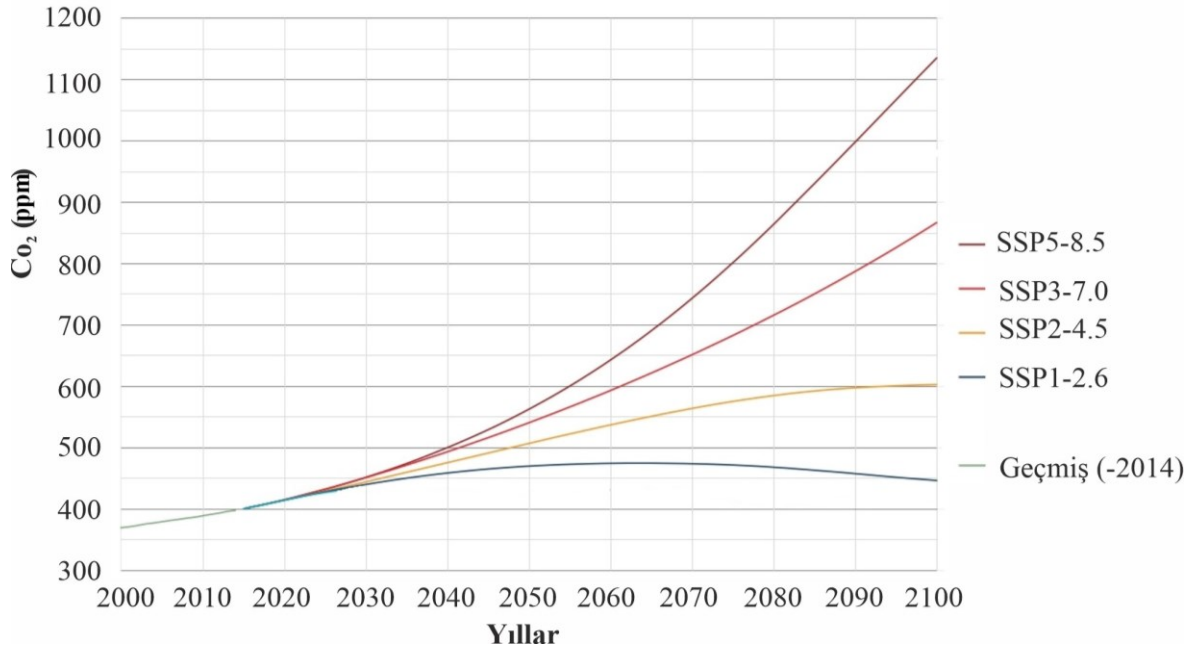
SSP2-4.5: Dünya; sosyal, ekonomik ve teknolojik eğilimlere göre şekillenen bir yol izlemektedir. Kalkınma ve gelir artışı eşitsiz bir şekilde gerçekleşmektedir. Bazı ülkeler ilerlemede daha başarılı olabilirken diğerleri geride kalmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmak için ulusal ve uluslararası kurumlar çaba sarf etmekte ancak bu süreç yavaş ilerlemektedir. Ekolojik sistemler, kaynak ve enerji kullanımındaki iyileştirmelere rağmen bozulmalar göstermektedir. Küresel nüfus artışı ılımlı bir şekilde devam etmekte ve ilerleyen yüzyılda azalmaya başlamaktadır. Gelir eşitsizliği yavaş da olsa azalmaktadır. Ancak toplumsal ve çevresel değişikliklere karşı kırılganlık azaltma çabaları hala zorluklarla karşı karşıyadır. Kısaca teknik olarak orta seviyede SGE ve yavaş sürdürülebilirlik politikasına sahip orta yol durumunu belirtir.

SSP3-7.0: Bu senaryoda, milliyetçilik ve rekabetçilik anlayışının yeniden ortaya çıktığı ve egemen olduğu görülmektedir. Güvenlik kaygıları ve bölgesel çatışmalar, ülkelerin iç ve dış meselelere daha fazla odaklanmasına yol açmaktadır. Politikalar zamanla ulusal ve bölgesel güvenlik sorunlarına yönelmektedir. Ülkeler, enerji ve gıda güvenliği hedeflerine ulaşmak için daha fazla çaba sarf etmektedirler. Bununla birlikte, eğitim ve teknolojik gelişim yatırımları azalmaktadır. Ekonomik büyüme yavaş ilerlemekte, hammadde tüketim yoğunluğu artmakta ve eşitsizlikler devam etmekte hatta artmaktadır. Nüfus artışı, sanayileşmiş ülkelerde düşüken, gelişmekte olan ülkelere yüksektir. Uluslararası bakış açısı, ekolojik yaklaşıma olan ilgiyi azaltmakta ve bu durum bazı bölgelerde ekolojik bozulmalara neden olmaktadır. Kısaca teknik olarak yüksek seviyede SGE ve daha fazla bölgesel rekabete sahip durumu belirtir.

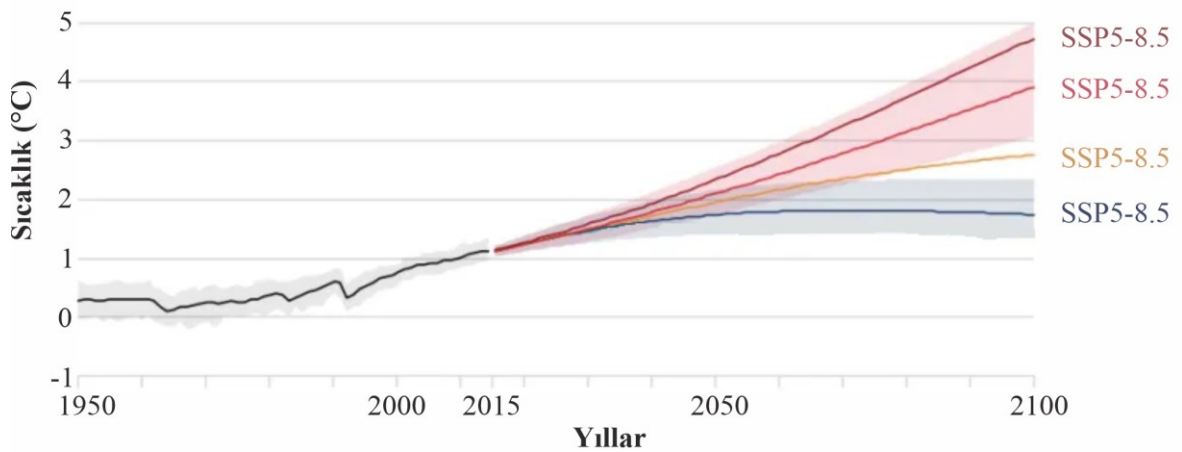
SSP5-8.5: Bu senaryoda, sürdürülebilir kalkınma için hızlı teknolojik ilerleme, rekabetçi pazarlama, yenilikçi yaklaşım ve katılımcı toplumlar öngörülmektedir. Küresel pazarlar birleşme eğilimi gösterirken, sağlık ve eğitim alanlarına önemli yatırımlar yapılarak sosyal sermaye artırılmaktadır. Bununla birlikte, ekonomik ve sosyal kalkınma baskısı, fosil yakıtların kullanımı ve enerji yoğun yaşam tarzları ile birleşmiştir. Bu etkenler küresel ekonominin hızlı büyümesine yol açarken, küresel nüfus 21. yüzyılda zirveye ulaşmakta ve azalmaya başlamaktadır. Yerel çevre sorunları, örneğin hava kirliliği başarıyla yönetilmektedir. Bu senaryoda, sosyal ve ekolojik sistemlerin etkin bir şekilde yönetilebileceğine yönelik bir düşünce hakimdir. Teknik olarak kısaca çok yüksek seviyede

SGE ve fosil yakıt büyüme politikasına sahip durumu belirtir (O'Neill vd., 2017; Riahi vd., 2017).

Bu senaryoların atmosferde oluşabilecek karbondioksit (CO₂) konsantrasyonları Şekil 3'te ve 1850-1900 dönemine kıyasla oluşan ve oluşabilecek sıcaklık artışları Şekil 4 ve Tablo 3'te verilmektedir.



Şekil 3. Küresel CO₂ ölçümleri ve SSP senaryolarına göre değişimleri (O'Neill vd., 2016)



Şekil 4. Gözlem ve sosyo-ekonomik senaryolar bazında 1850-1900 dönemine kıyasla küresel sıcaklık değişimleri (IPCC, 2021)

Tablo 3. Çalışmada kullanılan sosyo-ekonomik senaryoların özellikleri (IPCC, 2021)

SSP	Senaryo	Tahmini sıcaklık artışı (2041-2060)	Tahmini sıcaklık artışı (2081-2100)	Çok muhtemel aralık (2081-2100)
SSP1-2.6	Düşük sera gazı emisyonları: CO ₂ emisyonlarının 2075 civarında net sıfıra inmesi	1,7 °C	1,8 °C	1,3 – 2,4 °C
SSP2-4.5	Orta seviye sera gazı emisyonları: CO ₂ emisyonları 2050'ye kadar mevcut seviyelerde, ardından düşüyor ancak 2100'de net sıfıra ulaşmıyor	2,0 °C	2,7 °C	2,1 – 3,5 °C
SSP3-7.0	Yüksek sera gazı emisyonları: CO ₂ emisyonları 2100 yılına kadar ikiye katlanıyor	2,1 °C	3,6 °C	2,8 – 4,6 °C
SSP5-8.5	Çok yüksek sera gazı emisyonları: CO ₂ emisyonları 2075'e kadar üçe katlanıyor	2,4 °C	4,4 °C	3,3 – 5,7 °C

Şekil 3'e göre CO₂ konsantrasyonu günümüzde 400 ppm seviyelerini geçmiş, yüzyılın sonunda en iyimser senaryoya (SSP1-2.6) göre bu değer 450 ppm iken en kötümser senaryoya (SSP5-8.5) göre 11.40 ppm olması beklenmektedir. Şekil 4 ve Tablo 3'e göre küresel sıcaklıklarda en iyimser senaryoya göre yakın gelecekte 1,7 °C'lik bir artış uzak gelecekte 1,8 °C'lik bir artış, en kötümser senaryoya göre yakın gelecekte 2,4 °C'lik bir artış ve uzak gelecekte 4,4 °C'lik bir artış beklenmektedir. Çalışmada en iyimser ve en kötümser senaryolar ile kötümser senaryoya yakın olan SSP3-7.0 ara senaryosu dikkate alınmıştır. Senaryo seçiminde yaşanan güncel olaylar ve ülkelerin gelişim politikaları ile bu çalışma kapsamında kullanılan geleceğe yönelik su tüketim verilerinde var olma durumları göz önünde bulundurulmuştur.

2.6. Su Tüketim Verileri

Havzanın su güvenliği bakımından değerlendirilebilmesi için konum bazlı su tüketim verilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak Susurluk Havzası gibi her açıdan yoğun faaliyetlerin olduğu bölgelerde tarım, sanayi ve evsel gibi sektörel bazlı uzun yıllara dayanan su tüketim verilerine ulaşmada önemli zorluklar bulunmaktadır. Bu nedenle bölge ile ilgili

veriler küresel ölçekte sektörel bazlı su tüketim verilerini geçmiş ve gelecek senaryolarla modelleyerek üretilmiş ISIMIP (Warszawski vd., 2014) veri tabanından temin edilmiştir.

ISIMIP iklim değişikliğinin çeşitli sektörler ve bölgelere olan etkisini anlamak amacıyla geliştirilen bir araştırma projesidir. İklim değişikliği ile ilişkili etkilerin tarım, su kaynakları, enerji, sağlık ve diğer sektörler gibi farklı alanlardaki etkilerini değerlendirmeyi hedeflemektedir. ISIMIP, su tüketimi verilerini elde etmek için çeşitli modelleme yaklaşımlarını kullanmaktadır. Bu yaklaşımlar iklim modelleri, hidrolojik modeller, tarımsal üretim modelleri ve ekonomik modeller gibi farklı model türlerini içerebilmektedir. Bu modeller iklim değişikliği senaryolarını temel alarak su taleplerini ve su kaynaklarının yanıtını tahmin etmek için kullanılmaktadır (Warszawski vd., 2014; Wada vd., 2016).

Çalışma kapsamında ISIMIP projesinde bulunan tüm senaryo (SSP1-2.6, SSP3-7.0 ve SSP5-8.5) ve GDM'lerin (GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0 ve UKESM1-0-LL) zorlamasıyla oluşturulmuş küresel ölçekte $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ çözünürlükte tüm sektörlerin su tüketim verileri toplamı aylık ortalama değerler olarak temin edilmiştir.

2.7. Çok Değişkenli Uyarlamalı Regresyon Eğrileri (ÇDURE)

Parametrik olmayan yöntemler, değişkenler arasındaki doğrusal olmayan ilişkileri temsil etmek için birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Bunlardan biri olan ÇDURE, Friedman (1991) tarafından geliştirilmiş bir parametrik olmayan regresyon analizi yöntemidir. ÇDURE'nin temel üstünlüğü, karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri açıklayabilme yeteneğidir. Bu yöntemde, bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında herhangi bir ilişki varsayımı yapılmaz. Model, taban fonksiyonları ve ilişkili katsayılar kullanılarak veriye dayalı olarak oluşturulur. Bağımsız değişken değerlerinin bölgelere ayrılması ve her bölgenin bir regresyon denklemiyle açıklanması esas alınır. Ayrıca, amaç değişkeni, açıklayıcı değişkenler ve aralarındaki etkileşimlerle ilişkilendirilen taban fonksiyonlarının katkılarıyla tahmin edilir. ÇDURE, ileriye doğru ve geriye doğru adımlar içeren iki aşamadan oluşur. İlk aşamada ileriye doğru adım algoritması kullanılırken, ikinci aşamada geriye doğru adım algoritmasıyla temel fonksiyonlar sırasıyla elenerek en uygun model belirlenir (Nacar, 2020). ÇDURE aşağıdaki temel doğrusal fonksiyondan oluşur:

$$\check{Y} = c_j + \sum_{j=1}^k \theta_j T_j(x) \quad (1)$$

Burada c_j terim katsayısı ve θ_j her bir temel fonksiyonun ($T_j(x)$) katsayısıdır. Ayrıca, temel fonksiyon aşağıda verilen çiftler kümesinden elde edilir:

$$\begin{aligned} x_k > t_j &\Rightarrow T_j(x) = \max(0, (x_k - t_j)) \\ x_k < t_j &\Rightarrow T_j(x) = \max(0, (t_j - x_k)) \end{aligned} \quad (2)$$

Burada x_k k'inci değişkenin gözlem değeri ve t_j düğüm noktalarındaki sabitlerdir. Düğümler ise fonksiyonun eğiminin değiştiği noktalardır. ÇDURE'de, optimizasyon amacıyla iki aşamalı bir süreç kullanır. İlk aşama, ileriye doğru seçim içerir. İleriye doğru seçim adımlarında, artık hataları en aza indirmek için yeni temel fonksiyon çiftleri modelin yapısına eklenir. Seçilen düğümlerle ilişkili olarak temel fonksiyonlar, düğümün her iki tarafına çiftler halinde eklenir. Tüm değişkenlerin gözlenen değerleri, temel fonksiyonları oluşturmak için kullanılır ve bu değerler düğüm değerleri olarak test edilir. Yeni temel fonksiyon çiftleri, artık hatalar yeterince azalana veya maksimum temel fonksiyon sayısına ulaşana kadar eklenmeye devam eder. Genel olarak, ileriye doğru seçim aşaması modeli oldukça karmaşık yapıya dönüştürerek aşırı uydurmayı, geriye doğru seçim aşaması modele en az katkı sağlayan temel fonksiyonları çıkararak yine aşırı uydurmayı azaltmayı hedefler. Bu amaçla, genelleştirilmiş çapraz doğrulama kriteri kullanılır. Geriye doğru seçim adımlarında, modelin performansına en az katkı sağlayan temel fonksiyonlardan biri çıkarılır. Temel fonksiyonlar optimum sayısına ulaşıldığında geriye doğru seçim durdurulur (Kisi & Parmar, 2016; Zhang & Goh, 2016; Duzenli vd., 2018; Nacar, 2020).

2.8. Hidrolojik Modelleme

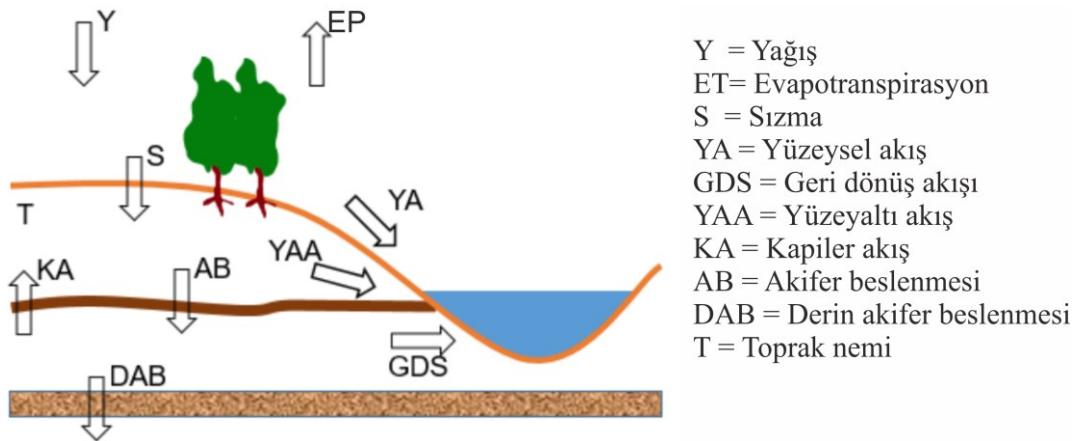
SWAT yani Toprak ve Su Değerlendirme Aracı; su, sediment ve tarımsal etkiler üzerindeki arazi kullanımı uygulamalarının tesirlerini incelemek için kullanılan havza ölçekli bir modeldir. Bu model, uzun dönemli iklim ve arazi kullanımı değişikliklerini, toprak ve yönetim koşullarını dikkate alarak evapotranspirasyon, bitki büyümesi, sızma, akış (yüzeysel ve yanal) erozyon gibi parametrelerin benzeşimlerini yapmaktadır. SWAT, su ve toprak kaynaklarının yönetimi ve sürdürülebilir tarım uygulamalarının değerlendirilmesi gibi önemli çevresel sorunları anlamak ve çözmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu model, bir havzanın fiziksel özelliklerini ve arazi kullanımını temel alarak, su döngüsü ve toprak

erozyonu gibi süreçlerin karmaşık etkileşimlerini benzeştirmektedir (Akbaş, 2018; Cüceloğlu, 2019).

Yarı-dağıtımlı bir hidrolojik model olan SWAT havza ölçeğinde girdi ve çıktı verilerini istatistiksel olarak modellenmek yerine; havza içindeki topografik özellikler, bitki örtüsü ve iklim verileri gibi fiziksel parametrelere dayanır. Bu özelliği sayesinde, verisi olmayan havzaların bile su, akış ve sediment gibi parametrelerini girdi parametreleriyle ilişkilendirilerek modelleyebilmektedir. Modelde her bir havzada daha ayrıntılı kullanım kolaylığı sağlanması amacıyla, havza alt havzalara bölünerek girdiler bu alt havzalara göre. Ayrıca, her bir alt havza için toprak, eğim ve arazi kullanımı birleştirilmesi yoluyla hidrolojik yanıt sistemi (HRU) adı verilen birleşimler elde edilmektedir. HRU'nun hidrolojik bileşenleri arasında yağış, kar erimesi, sulama suyu, sızma, toprak profilindeki su dağılımı, bitki evapotranspirasyonu, toprak profilindeki yüzey altı akışı ve sığ yeraltı sularından geri akış gibi süreçler yer almaktadır (Beven, 2012; Akbaş, 2018; Cüceloğlu, 2019; Jouma, 2019). Modelin temel denklemi olan su bilançosu aşağıdaki gibidir:

$$TSI_t = TSI_0 + \sum_{i=1}^t (Y - YA - ET - V - YAS) \quad (3)$$

Burada, Y i 'inci günde yağışı (m), YA i 'inci günde yüzeysel akışı (m), ET i 'inci günde evapotranspirasyonu (m), V i 'inci günde topraktaki vadoz (doymamış) bölgede yüzeysel akışı (m), YAS i 'inci günde yeraltı suyundan dönen su miktarını (m), TSI_0 ilk gündeki topraktaki su içeriğini ve t (gün) zamanı göstermektedir (Peker & Cüceloğlu, 2022; Özdemir & Akbaş, 2023). Modeldeki hidrolojik süreçlerin basit gösterimi Şekil 5'te verilmektedir.



Şekil 5. SWAT modelindeki temel hidrolojik süreçlerin gösterimi (Cüceloğlu, 2019)

2.9. Su Güvenliği Parametreleri

Su güvenliğini değerlendirmek için mavi ve yeşil su Hoekstra vd. (2011) tarafından geliştirilen Su Ayak İzi kavramına dahil edilmiştir. Mavi su, kara yüzeyinden veya yer altından akarak akifer, göl ve rezervuarlarda depolanırken, yeşil su toprağa sızarak toprak nemine dönüşen veya geçici olarak toprak veya bitki örtüsünün üzerinde kalan yağışın bir bölümünü ifade etmektedir. Mavi su ve yeşil su ayak izi bileşenleri, çevresel sürdürülebilirlik ve insan faaliyetlerinin tatlı su kaynaklarının mevcut sağlama düzeyleriyle ilişkilendirilerek değerlendirilebilir. Bu değerlendirme, kurak dönemler gibi yılın farklı zaman dilimleri ve alt havzalar gibi coğrafi konumlar göz önünde bulundurmasıyla gerçekleştirilerek, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini desteklemekte ve su çatışmaları ve sorunlarının ortaya çıkma olasılığı daha yüksek olan dönemlerin ve bölgelerin tespitine katkı sağlamaktadır. Bu yaklaşım, su kaynaklarının etkili bir şekilde kullanılmasını ve gelecekteki olası su güvenliğinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Hoekstra vd., 2011; Rodrigues vd., 2014). Bu sebeple, Rodrigues vd. (2014) tarafından önerilen bir su güvenliği hesaplama süreci, su güvenliği değerlendirmesiyle ilgili kavramları bütünleştirerek insan ve su ekosistemi güvenliğine yönelik birincil tehditlerin belirlenmesine yardımcı olabilecek bir yaklaşım sunmaktadır. Bu süreç, mavi ve yeşil su kıtlığı ile kırılganlık temellerini ele alarak, suyla ilişkili olan ve su güvenliğini tehdit eden faktörlerin tanımlanmasını hedeflemektedir. Bu şekilde, su kaynaklarının sınırlı olduğu durumlar ve su sistemlerinin hassas olduğu bölgeler belirlenebilmekte ve su güvenliği konusundaki anlayışın gelişmesine yardımcı olmaktadır. Bu hesaplama süreci, su yönetimi ve politika oluşturma süreçlerinde bilimsel ve karar verme temelli bir yaklaşım sunarak, su güvenliği alanında ilerlemeyi teşvik etmektedir. Mavi su güvenliğinin kıtlık ve hassasiyet parametreleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Rodrigues vd., 2014):

$$MSK = \frac{MST}{MSD} \quad (4)$$

$$MSH = \frac{MST}{MS_{P30m}} \quad (5)$$

Burada *MSD* mavi su mevcudiyetidir. SWAT çıktıları içinden su verimi (WYLD.hru) ve derin akiferdeki su miktarının (DA_RCHG.hru) toplamıdır. *MST* farklı sektörlerdeki tüketilen su miktarı, *MSK* zaman ve konumdaki mavi su kıtlığını ifade etmektedir. *MS_{P30m}*

zamanın %70'inde aşılın tarihsel düşük mavi su kullanılabilirliğini göstermekte ve hesaplanan mavi su kullanılabilirliğinin 30. yüzdelik dilimi olarak temsil edilmektedir. *MSH* mavi su hassasiyetidir ve güvenlik açığının %100'den fazla olması, belirli konumun çevresel olarak savunmasız olduğunu veya düşük akım koşullarında insan kullanımı için suyun mevcudiyetinin minimumun altında olduğu ekolojik bir sıcak nokta olduğunu göstermektedir (Abbaspour vd., 2009; Padowski & Jawitz, 2012; Rodrigues vd., 2014; Veettil & Mishra, 2016).

Yeşil su güvenliğinin kıtlık ve hassasiyet parametreleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Rodrigues vd., 2014):

$$YSK = \frac{YST}{YSD} \quad (6)$$

$$YSH = \frac{YST}{YS_{P30m}} \quad (7)$$

Burada *YSD* yeşil su mevcudiyetidir. SWAT çıktıları içinden ilgili zamanın başındaki toprak su içeriğidir (SW_INIT.hru, mm). *YST* gerçek evapotranspirasyon miktarıdır (ET.hru). *YSK* yeşil su kıtlığını ifade etmektedir. *YS_{P30m}* zamanın %70'inde aşılın tarihsel düşük yeşil su kullanılabilirliğini göstermekte ve hesaplanan yeşil su kullanılabilirliğinin 30. yüzdelik dilimi olarak temsil edilmektedir (Abbaspour vd., 2009; Rodrigues vd., 2014). Geçmiş çalışmalarda mavi ve yeşil su parametrelerinin birbirleri ile ilişkilerini incelemek amacıyla farklı hesaplamalar önerilmiştir. Bunlardan ilki yağışın yeşil suya dönüşmesini sağlayan faktörü temsil eden yeşil su depolama katsayısı (*YSDK*) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır (Wu vd., 2021a):

$$YSDK = \frac{YSD}{YSD + MSD} \quad (8)$$

YSDK değerinin 1'e yakın olması daha iyi bitki örtüsü ve çevre koşullarına işaret eder. Değer arttıkça evapotranspirasyon artar, bu da yüzey bitki örtüsünün korunduğunu ve erozyonun azaldığını gösterir. Sonuç olarak hem yüzey akışının hem de sediment veriminin azalması beklenmektedir (Liang vd., 2021; Sobhani vd., 2023). Mavi ve yeşil suyun tüketimi

ilişkisini incelemek amaçlı Mao vd. (2020) tarafından önerilen mavi su tüketim katsayısı (MSTK) aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$MSTK = \frac{MST}{YST + MST} \quad (9)$$

MSTK su tüketiminin mavi su kaynaklarına bağımlılığını yansıtır. Belirli bir bölge için yüksek bir MSTK değeri, bu bölgede mavi suya olan bağımlılığın yüksek olduğunu gösterir (Mao vd., 2020). Mavi ve yeşil suyun depolama ve tüketim olarak ilişkisi geçmiş çalışmalarda incelenmiş olsa da kıtlık için bir değerlendirme yapabilme imkanı tanıyan bir hesaplamaya rastlanmamıştır. Bu eksikliği gidermek amaçlı mavi su kıtlık katsayısı (MSKK) ilk kez bu çalışmada aşağıdaki gibi önerilmiştir:

$$MSKK = \frac{MSK}{YSK + MSK} \quad (10)$$

Belirli bir bölge için MSKK değeri %50'den yüksek ya da düşük oluşu bu bölgenin mavi ya da yeşil su kıtlığı bakımından etkilenmesinin yüksek olduğunu göstermektedir.

2.10. Tahminleyici, Çözünürlük ve Sayısal Ağ Koşulu Seçim Metodolojisi

İÖİ model kurulumundan önce, tahminleyicilerin seçimi model doğruluğu bakımından önemli bir adımdır. Çünkü fiziksel ve mantıksal bileşenlerin kullanılması bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında anlamlı bağlantılar sağlar (Wilby vd., 2002; Borges vd., 2017). Akdeniz iklimi yağışları da dinamik ve termodinamik süreçlerin etkileşiminden kaynaklanmaktadır (Keupp vd., 2019). Bu çalışmada günlük ve şiddetli yağışları başarılı bir şekilde tahmin eden geçmiş yayınlar (Chen vd., 2010; Beecham vd., 2014; Bettolli & Penalba, 2018; Yang vd., 2018; Keupp vd., 2019; Jafarzadeh vd., 2021) dikkate alınarak Tablo 4'te verilen değişkenler İÖİ için bağımsız değişken olarak seçilmiştir.

Tablo 4. Çalışmada kullanılan ERA5 yeniden analiz tahminleyici değişkenleri

Tahminleyici tanımı	Kısaltma	Basınç Seviyeleri (hPa)
Jeopotansiyel yükseklik	z_500	500
	z_700	700
	z_850	850
Bağıl nem	r_500	500
	r_700	700
	r_850	850
Meridyonel rüzgar hızı	u_500	500
	u_700	700
	u_850	850
Bölgesel rüzgar hızı	v_500	500
	v_700	700
	v_850	850
Ortalama sıcaklık (basınç seviyelerinde)	t_500	500
	t_700	700
	t_850	850
Ortalama sıcaklık (2 m yükseklikteki)	tm	Yüzey
Ortalama deniz seviyesi basıncı	slp	Yüzey
Toplam yağış	tp	Yüzey

Çok sayıda tahminleyici ile İÖİ yöntemlerinin kurulması daha fazla hesaplama süresi ve aşırı uyum nedeniyle önerilmemektedir (Mujumdar & Nagesh Kumar, 2012; Das & Nanduri, 2018). Tahminleyici seçimi için farklı yöntemler kullanılsa da kullanım kolaylıkları nedeniyle genellikle Pearson ve Spearman gibi korelasyon yöntemleri tercih edilmektedir. Farklı regresyon yöntemleri de dahil olmak üzere, bunların üstünlükleri son zamanlarda karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır (Yang vd., 2018; Liu vd., 2019; Jafarzadeh vd., 2021). Pearson'a göre uç durumlardan daha az etkilenen, herhangi bir varsayım içermeyen ve doğrusal olmayan ilişkileri araştıran (Şen, 2020) Spearman korelasyonunun kullanım sıklığı oldukça fazladır (Chen vd., 2010; Lin vd., 2017; Liu vd., 2019). Bu nedenle tahminleyicilerin seçimi %1 anlamlılık düzeyinde Spearman korelasyonu ve ilgili meteoroloji istasyonunun bulunduğu sayısal ağ değerleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

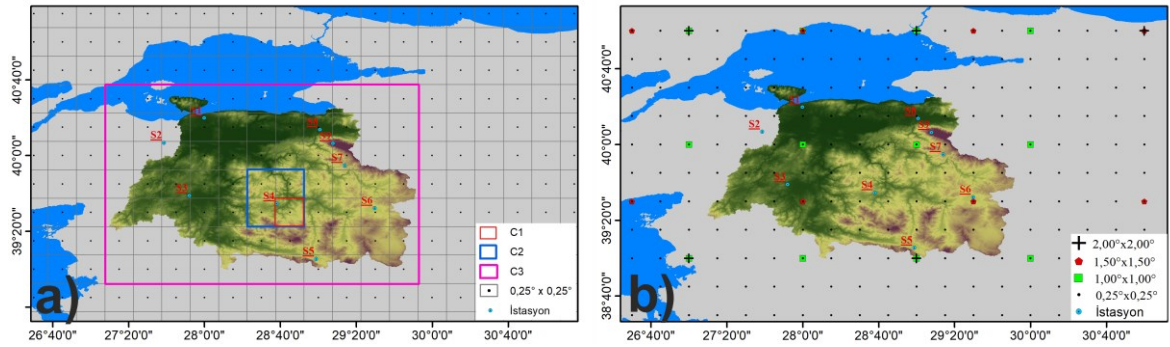
Tahminleyici seçiminin yanı sıra, uzak sayısal ağlar yerel iklimi farklı zamanlarda etkileyebileceğinden İÖİ çalışmalarında birden fazla sayısal ağ kullanımı model doğruluğunu geliştirebilmektedir (Wilby & Wigley, 2000; Crawford vd., 2007). Bunun yanında, tahminleyici seti ile GDM'ler arasındaki çözünürlük farkı da ilave bir belirsizlik nedeni olabilmektedir (Amjad vd., 2020). Bu nedenle sayısal ağ çözünürlüğünü, tahminleyici seçimini ve uzak mesafeli sayısal etkisini ayrı ayrı değerlendiren çalışmalar bulunmaktadır (Borges vd., 2017; Yang vd., 2018; Amjad vd., 2020; Jafarzadeh vd., 2021). Geçmiş çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada bu unsurların tümü birlikte değerlendirilmiştir.

GDM ve referans verileri genellikle sayısal ağ merkezleri ile örtüştürülmektedir (Sarhadi vd., 2016; Khan vd., 2020). Bu çalışmada kullanılan ERA5 setinin asıl çözünürlüğü $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ iken, GDM'lere ait çözünürlükler yaklaşık $1,00^{\circ}$ - $3,00^{\circ}$ arasındadır. GDM'leri daha büyük çözünürlüğe dönüştürdükten sonra GDM'ler ve yeniden analiz veri setinin sayısal merkezlerinin üst üste binmesi İÖİ modellerinde ilave belirsizliğe neden olabilmektedir (Amjad vd., 2020). Bu nedenle, ERA5 asıl çözünürlüğüne ek olarak, CMIP6'daki GDM çözünürlüklerinin ortalama ve standart sapmaları dikkate alınarak yeniden analiz verileri üç farklı çözünürlükte ($1,00^{\circ} \times 1,00^{\circ}$, $1,50^{\circ} \times 1,50^{\circ}$ ve $2,00^{\circ} \times 2,00^{\circ}$) elde edilmiştir. Uzak sayısal ağlar yerel iklimi farklı zamanlarda etkileyebileceğinden (Wilby & Wigley, 2000; Crawford vd., 2007; Amjad vd., 2020), istasyonun bulunduğu sayısal ağ koşuluna (C1) ek olarak, istasyona en yakın sayısal ağ merkezleri dikkate alınarak istasyonların çevresindeki dört sayısal ağ ortalama durumu (C2) ve havzanın sayısal ağ ortalama durumu (C3) da dikkate alınmıştır (Şekil 6a). Bazı çalışmalarda (Chen vd., 2014; Borges vd., 2017; Lin vd., 2017; Saengsawang vd., 2017), tahmin edicilerin mevcut gün değerlerine (lag-0) ek olarak bir günlük gecikme değerleri (lag-1) modellerin performansını arttırdığı görülmüştür. Bu nedenle, tahmin edicilerin lag-1 değerleri de Spearman korelasyonu hesaplamalarına dahil edilmiştir. Ardından, Spearman korelasyonunun mutlak değerleri alınarak en etkin ilk 12 tahminleyici seçilmiştir. Tahminleyici belirlemede yüksek sayıda tahminleyici ile değerlendirme yapılırken, genellikle oldukça düşük sayı ile başarılı ilişkiler elde edilebildiğinden 12 sayısından daha fazla tahminleyici kullanılmamıştır (Liu vd., 2013, 2019). İlk tahminleyici seçimi istasyonların bulunduğu ERA5 verilerinin asıl çözünürlüğünde yapıldıktan sonra, Spearman korelasyon analizi dört farklı çözünürlük ($0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$, $1,00^{\circ} \times 1,00^{\circ}$, $1,50^{\circ} \times 1,50^{\circ}$ ve $2,00^{\circ} \times 2,00^{\circ}$) (Şekil 6b), üç farklı sayısal ağ durumu (C1, C2 ve C3) ve iki farklı zaman durumu (lag-0 ve lag-1) ile gerçekleştirilmiştir. En uygun sayısal ağ, çözünürlük ve tahminleyicileri bütüncül olarak belirlemek için, tüm olası regresyon (APR, All Possible Regression) yöntemi kullanılmıştır. APR yöntemi içinde çoklu doğrusal regresyon denkleminde faydalanılmıştır. Bu yöntem kullanılmadan önce modellerde oluşabilecek yanlışlıkları azaltmak için (Wilby vd., 2004; Nacar, 2020) veriler 1979-2018 dönemi için standardize edilmiştir. APR, tahminleyiciler için tüm olası regresyonları değerlendirdiği için büyük üstünlük sağlamaktadır. k aday tahminleyicilerin sayısı olup APR modellerinin toplam sayısı $2^k - 1$ 'dir. En iyi modeli seçmek için önceki çalışmalar tarafından başarıyla kullanılan *Mallows' C_p* yöntemi kullanılmıştır (Mallows,

1973; Fistikoglu & Okkan, 2011; Okkan & Kirdemir, 2016). Mallows' C_p değeri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$C_p = (n - k) \frac{SR_i^2}{SR_F^2} - (n - 2i) \quad (11)$$

Burada n veri sayısı, k aday tahminleyicilerin sayısı, i model parametresi sayısı, SR_i^2 i parametrelili modeldeki artık kareler toplamı ve SR_F^2 tüm modeldeki artık kareler toplamıdır. C_p değerinin hem küçük hem de ne kadar $i + 1$ 'e yakın olması, model uyumunu arttırmaktadır (Pardoe, 2013; URL-16, 2021). APR yöntemin uygulaması R programında yazılmış olan “olsrr” paketi (Hebbali, 2020) kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6. Örnek ERA5 a) farklı sayısal durum gösterimi, b) farklı çözünürlük gösterimi

Hidrolojik modellemelerde en önemli girdi olan yağışın belirsizliği ve rastgeleliği sıcaklığa göre daha yüksektir. Bu nedenle tahmin performansı genellikle daha düşüktür (Abbaspour, 2015; Rashid vd., 2015; Zhao vd., 2018; Gao vd., 2019; Wu vd., 2021). Yağış için daha iyi bir tahmin performansı ortaya koymak adına; tahminleyici, çözünürlük ve sayısal ağ durumları ile ilgili seçim sadece yağış değişkeni dikkate alınarak yapılmıştır. Daha sonra yapılan seçimler dikkate alınarak sıcaklıklar için tahminler gerçekleştirilmiştir.

2.11. Yağış ve Sıcaklık Değerleri İçin İstatistiksel Ölçek İndirgeme Modellerinin Kurulumu

Tahminleyici, sayısal ağ durumu ve çözünürlük seçiminden sonra ÇDURE yöntemi ile İÖİ modellerinin kurulumu gerçekleştirilmiştir. ÇDURE yöntemi; yağış ve sıcaklık değişkenlerini, aylık ve uç yağışları tahmin performanslarının yüksek olması yanı sıra bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkileri açıklaması nedeniyle geçmiş çalışmalarda sıklıkla tercih edilmiştir (Nasseri vd., 2013; Tavakol-Davani vd., 2013; Kisi & Parmar, 2016; Duzenli vd., 2018; Nacar vd., 2022a, 2022b). Maraun vd. (2010) ile Hertig ve Jacobeit (2013) tarafından yapılan İÖİ çalışmalarında, tahmin ediciler ve tahmin edilenler arasındaki ilişkinin değişen iklim koşulları altında değişmeyeceği varsayılmaktadır. Ayrıca 40 yıllık verilerin, daha seyrek iklim olayları da dahil olmak üzere söz konusu alan için gerçek iklim koşullarını temsil edebileceği belirtilmektedir (Khan vd., 2006). Yine bazı çalışmalarda (Khan vd., 2006; Huang vd., 2011; Nasseri vd., 2013; Tavakol-Davani vd., 2013) uzun eğitim süresinin modellerin performansını ve modellerin nadir iklim olaylarını yakalama potansiyelini artırdığı belirtilmiştir. Ayrıca Wilby (2004) çalışmasında İÖİ modelinin uzun bir kalibrasyon periyodu kullanarak durağan olmayan bir performans sergilenebileceğini belirtmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada İÖİ için 1979-2018 arasını kapsayan 40 yıllık dönem dikkate alınmıştır. Bu dönemin ilk 30 yılı (%75) modellerin eğitimi ve son 10 yılı (%25) arasındaki bölümü ise modellerin testi için kullanılmıştır.

2.11.1. Günlük Yağış ve Sıcaklıklar İçin Model Performanslarının Değerlendirmesi

Günlük yağış tahminine ilişkin model performansları genellikle ortalama, standart sapma ve çarpıklık gibi temel istatistiksel değerler kullanılarak ayrı ayrı değerlendirilmektedir (Hessami vd., 2008; Liu vd., 2013; Rashid vd., 2015). Bazı çalışmalar (Nasseri vd., 2013; Tavakol-Davani vd., 2013) bu parametreleri bütünsel olarak değerlendirmiş olsa da çoğunlukla ortalamaya ait ağırlıkları artırarak değerlendirme yapmışlardır. Ancak hidrolojik modeller için ortalama değerler kadar uç değerler ve yağış değişkenliği de önemlidir (Liu vd., 2013; Pour vd., 2014; Rashid vd., 2015). Bu nedenle, Gupta vd. (2009) tarafından önerilen ve hidrolojik modellemede son zamanlarda sıklıkla kullanılan Kling-Gupta verimlilik (KGE) indeksi (Lamontagne vd., 2020), yağışın

istatistiksel momentlerini bütünsel olarak değerlendirmek için modifiye edilmiştir. Denklem 11’de verilen KGE’deki korelasyon parametresinin yerine nadir görülen ortalamadan aşırı sapmalar hakkındaki bilgileri değerlendirme imkanı sunan çarpıklık parametresi eklenerek (Chen vd., 2010), KGE formülasyonu Denklem 13’deki gibi değiştirilmiştir:

$$KGE = 1 - \sqrt{(\rho - 1)^2 + \left(\frac{\bar{u}_m}{\bar{u}_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_o} - 1\right)^2} \quad (12)$$

$$KGES = 1 - \sqrt{\left(\frac{\zeta_m}{\zeta_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\bar{u}_m}{\bar{u}_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_o} - 1\right)^2} \quad (13)$$

Burada ρ , gözlem verileri ile model değerleri arasındaki doğrusal korelasyonu; $\bar{u}_o$ ve $\bar{u}_m$, gözlem verileri ile model değerlerinin aritmetik ortalamalarını; σ_o ve σ_m , gözlem verileri ile model değerlerinin standart sapmalarını; ζ_o ve ζ_m , gözlem verileri ile model değerlerinin çarpıklık katsayılarını ve $KGES$ bu çalışmada kullanılan istatistiksel momentlerin bütüncül olarak değerlendirme imkanı sunan KGE’nin değiştirilmiş halini ifade etmektedir. KGE gibi $KGES$ de $(-\infty, 1]$ arasında değişmekte ve en optimum değeri 1 olup ne kadar yakın değer alırsa model performansı o kadar yüksektir. Ayrıca geçmiş çalışmalarda sıklıkla tercih edilen model performans indeksi olan Nash-Sutcliffe (NSE) bu çalışmada kullanılmıştır. NSE aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$NSE = 1 - \frac{(\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2)}{(\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2)} \quad (14)$$

Burada x_i , gözlem verilerini; y_i , model değerlerini; $\bar{x}$, gözlem verileri aritmetik ortalamasını ve N , veri uzunluğunu ifade etmektedir. KGE’ye benzer şekilde NSE’nin değerleri $(-\infty, 1]$ arasında değişmekte ve en uygun durum 1 olup bu değere ne kadar yakın değer alırsa model performansı o kadar yüksektir. KGE ve NSE indekslerinin hesaplamaları R programında yazılmış olan “hydroGOF” paketi (Zambrano-Bigiarini, 2020) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, günlük yağış oluşumlarının (kuru/yağışlı gün) her bir modeldeki performansını değerlendirmek için tutarlılık tablosu kullanılmıştır (Tablo 5). Burada dört farklı durum ortaya çıkmaktadır:

Iskalar: kuru gün olarak modellenen gözlemlenmiş yağışlı gün sayısı,

Yanlış alarm: yağışlı gün olarak modellenen gözlemlenmiş kuru gün sayısı,

İsabetler: yağışlı olayların gerçek ayırt edici sayısı,

Doğru negatif: kuru gün olayların gerçek ayırt edici sayısı. Doğruluk (DO) ise Denklem 15 ile hesaplanmaktadır.

Tablo 5. İstatistiksel ölçek indirgeme modelleri için tutarlılık tablosu

Modellenmiş yağış olayları	Gözlemlenmiş yağış olayları	
	Yağışlı gün	Kuru gün
Yağışlı gün	İsabetler (YY)	Yanlış alarm (KY)
Kuru gün	Iskalar (YK)	Doğru negatif (KK)

$$DO = \frac{YY + KK}{YK + YY + KY + KK} \quad (15)$$

Burada DO [0, 1] arasında değişmekte ve en uygun durumda 1 olup 1'e ne kadar yakın değer alırsa model performansı o kadar yüksek olur.

2.12. Gelecek Senaryolara Göre Yağış ve Sıcaklık Verilerinin Elde Edilmesi

GDM'ler model varsayımları, parametrisasyon ve tahmin yetersizliğinden kaynaklı belirsizlikler içermektedir. Bu belirsizlikleri azaltmak için GDM çıktılarının aritmetik ortalaması alınarak çoklu model topluluğu ortalaması (ÇMTO, ensemble) yöntemi sıklıkla uygulanmaktadır. Bazı çalışmalar (Giorgi & Mearns 2002; Grose vd., 2020), geleceğin tahmininde herhangi bir performans sıralaması yapmadan tüm GDM'lerden faydalanmaktadır. Bu şekilde özellikle orografiği veya sınır yapısını yeterince temsil edemeyen düşük performanslı GDM'lerin dikkate alma olasılığı nedeniyle ÇMTO yönteminin başarısı düşebilmektedir. Ayrıca, GDM'lerin sayısı arttıkça ÇMTO'nun veri yükü ve hesaplama süresi de artmaktadır. Dolayısıyla, ÇMTO'nun makul sayıda GDM ile tanımlanması modelin doğruluğu ve kurulumu açısından önemli hale gelmektedir. Bu noktada ÇMTO için yüksek performanslı GDM'lerin seçilmesi önemli bir seçenek olarak görülmektedir. Bu nedenle, iklim modellemesi içeren çalışmalarda (Wang vd., 2018; Ahmed vd., 2020; Bağcı vd., 2021; Seker & Gumus, 2022), ÇMTO için genellikle yüksek tahmin

performansına sahip ilk üç veya dört GCM kullanılmaya başlanmıştır. Sonuç olarak en iyi GDM'lere ait çıktıların aritmetik ortalaması alınarak ÇMTO üretilmektedir.

ÇMTO yöntemi uygulanmadan önce ilk olarak CMIP6 arşivindeki geçmiş (1979-2014), SSP1-2.6, SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 (2015-2099) senaryolarını barındıran GDM'ler belirlenmiştir. Sonra bunların içinden gelecekteki yağış ve sıcaklık değerlerinin elde edilmesi için kurulmuş olan İÖİ modellerinde kullanılan tahminleyici değişkenlerini içinde barındıran GDM'ler belirlenmiştir. ERA5 çözünürlüğü ile GDM'lerin çözünürlükleri birbirinden farklı olduğundan GDM'ler havza için belirlenen en uygun çözünürlüğe göre iki yönlü interpolasyon yöntemi ile yeniden boyutlandırılmıştır. Bu işlem R programında yazılmış olan "metR" paketi (Campitelli, 2021) ile gerçekleştirilmiştir. Seçilen GDM'lerin geçmiş senaryo tahminleyici değişkenleri her bir istasyonun günlük toplam yağış, minimum ve maksimum sıcaklıkları için kurulmuş olan İÖİ modellerine girdi olarak verilerek ölçek indirgenmiş veriler elde edilmiştir.

Havzayı en iyi temsil edecek ölçek indirgenmiş GDM'lerin seçimi için günlük ve aylık toplam yağışlar üzerinde KGE indeksi ve günlük değerler üzerinde BO yöntemi ile her bir istasyon için sıralama yapıldıktan sonra havza ortalaması alınarak tekrar sıralama yapılmıştır. Böylelikle her bir GDM'nin havzayı temsil etme kabiliyeti sıralanmış ve performansı yüksek ilk dört GDM, ÇMTO için seçilmiştir. ÇMTO, ölçek indirgenmiş ilk dört GDM'nin geçmiş yağış ve sıcaklık verileri girdi olarak kullanılarak ÇDURE yöntemi ile gözlem verilerinin tahmin edilmesiyle oluşturulmuştur. Ölçek indirgenmiş dört GDM'nin gelecek senaryo verileri oluşturulmuş ÇMTO'lara girdi olarak verilmiştir. Bu şekilde her istasyona ait farklı senaryolar için tek bir yağış, minimum ve maksimum sıcaklık verisi elde edilmiştir.

GDM'ler ve yeniden analiz verileri, iklimsel fiziksel süreçlerin yanlış tasviri, parametre optimizasyonu ve kara-deniz atmosferinin karşılıklı etkileşimleri gibi parametrelerin neden olduğu yanlışlıklar içerebilmektedir. Model doğruluğunu arttırmak için yanlışlık düzeltme süreci sıklıkla uygulanmaktadır (Troin vd., 2015; Sippel vd., 2016; Nguyen vd., 2020). Yanlılığı azaltmanın en basit yolu ise İÖİ modellerini ve GCM verilerini oluştururken tahminleyicileri ve tahmin verilerini standartlaştırmaktır (Wilby vd., 2004; Themessl vd., 2012). Ancak verileri standartlaştırma yeterli olamadığı durumlarda (Şan vd., 2023) farklı yöntemler de kullanılmaktadır. Kantil haritalama (KH) yöntemi, GDM'ler tarafından modellenen çok fazla yağışlı gün durumunda etkili olduğu için geçmiş çalışmalarda sıklıkla tercih edilmiştir (Rashid vd., 2015; Maraun, 2016). Ancak KH durağan

olduğundan ve mevcut eğilimleri dikkate almadığından (Switanek vd., 2017), Kantil delta haritalama (KDH), doğrusal ölçekleme vb. farklı yöntemler de yanlılık düzeltmesi için kullanılmaktadır (Cannon vd., 2015; Switanek vd., 2017; Lange, 2019). KDH uç değerleri başarıyla temsil eden, durağan olmayan ve mevcut eğilimleri göz ardı etmeyen bir yöntem olduğu için (Cannon vd., 2015; Xavier vd., 2022) bu çalışmada yanlılık düzeltmede ikincil işlem olarak tercih edilmiştir. KDH kısaca aşağıdaki açıklanmaktadır (Cannon vd., 2015; Nacar, 2020; Xavier vd., 2022):

İlk olarak KDH, model projeksiyonu $y_{m,p}$ serisinin zamana bağlı kümülatif yoğunluk fonksiyonunu (KYF) kullanır. KYF, t zamanı tarafından verilen bir zaman penceresi ile tahmin edilir. $\delta_{m,p}$, t zamanı ile ilişkili aşmama olasılığıdır.

$$\delta_{m,p}(t) = F_{m,p}^{(t)}[y_{m,p}(t)], \quad \delta_{m,p}(t) \in \{0,1\} \quad (16)$$

Bu değer geçmiş ters KYF, $F_{m,p}^{-1}$ 'e girilerek, geçmiş dönemde karşılık gelen modellenmiş $\delta_{m,p}$ miktarı bulunabilir. Denklem (16), t ile geçmiş dönem arasındaki göreceli kantil değişimleridir:

$$\Delta_m(t) = \frac{F_{m,p}^{(t)-1}[\delta_{m,p}(t)]}{F_{m,h}^{-1}[\delta_{m,p}(t)]} = \frac{\delta_{m,p}(t)}{F_{m,h}^{-1}[\delta_{m,p}(t)]} \quad (17)$$

Geçmiş dönem boyunca gözlemlenen $\delta_{m,o,h}$ değerlerinden tahmin edilen ters KYF uygulanarak modellenen $\delta_{m,p}$ kantil herhangi bir t değerinde düzeltilebilir.

$$\hat{y}_{o:m,h:p}(t) = F_{o,h}^{-1}[\delta_{m,p}(t)] \quad (18)$$

$$\hat{y}_{m,p} = \hat{y}_{o:m,h:p}(t) \times \Delta_m(t) \quad (19)$$

KDH, Li vd. (2014) tarafından önerilen eşit mesafeli KYF eşleştirme algoritması ile ilişkili olup Cannon vd. (2015) tarafından gösterildiği gibi, KH algoritmalarına göre aşırı yağışlardaki göreceli eğilimleri büyütme gibi sorunlara daha az eğilimlidir. Bu çalışmada verilerin mevsimselliği kaybedilmek istenmediği (Afshar vd., 2019) için KDH yöntemi,

aylar içindeki günlük verilere uygulanmış olup yöntemin ayrıntıları Cannon vd. (2015), Nacar (2020) ve Cannon (2023) çalışmalarından ulaşılabilir. Yöntemin uygulaması R programında yazılmış olan “MBC” paketi (Cannon, 2023) kullanılarak yapılmıştır.

2.13. SWAT Modelinin Kurulumu, Ayarlanması ve Su Güvenliği Hesaplamaları

Su güvenliği hesaplamalarını gerçekleştirmek için öncelikle SWAT modelinin kurulumu yapılmıştır. Bunun için gerekli dört ana veri seti kullanılmıştır:

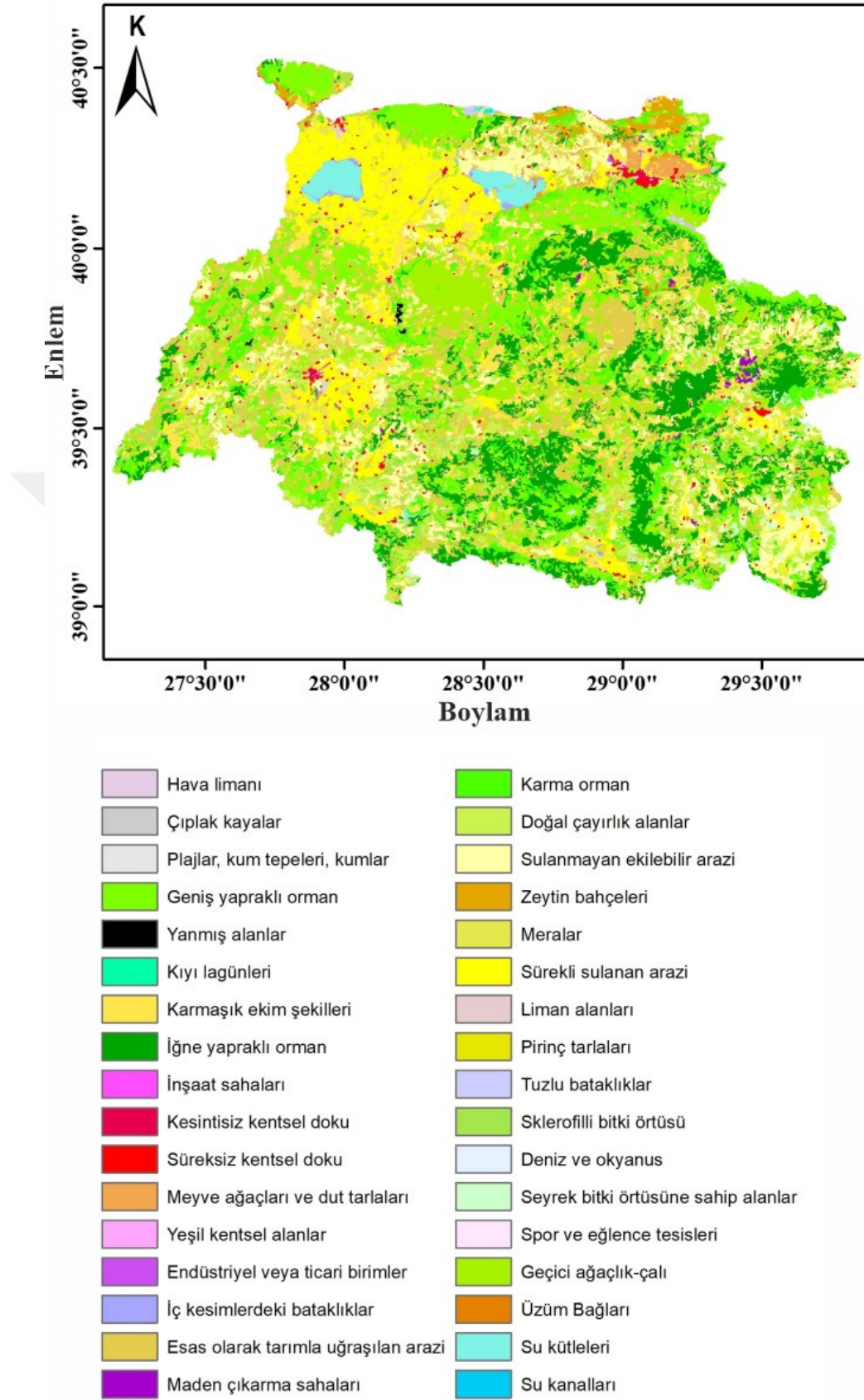
1) Sayısal yükseklik modeli (DEM) olarak 90 m çözünürlüklü HydroSHEDS (Lehner vd., 2008) verisi kullanılmıştır. Yüksek çözünürlüklü sayısal yükseklik verileri olsa da ova tabanı gibi düzlüklerde akarsu ağını yanlış göstermektedirler. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) temel alınarak oluşturulan hidrolojik analizler için uygun olması nedeniyle HydroSHEDS verisi tercih edilmiştir (Akbaş, 2018).

2) Arazi kullanım verisi olarak 100 m çözünürlüklü “Corine Land Cover (CLC) 2000, Version 2020_20u1” kullanılmıştır (Şekil 7).

3) Toprak tipi verisi FAO-UNESCO tarafından oluşturulan 1:5.000.000 ölçekli dünya toprak verisinden havza sınırlarını kapsayacak şekilde elde edilmiştir (<https://swat.tamu.edu/data/>).

4) Hidroklimatolojik veriler için meteoroloji verileri MGM’den temin edilen ve Tablo 1’de sunulan istasyonlardaki günlük toplam yağış, günlük maksimum ve minimum sıcaklık değerleri kullanılmıştır.

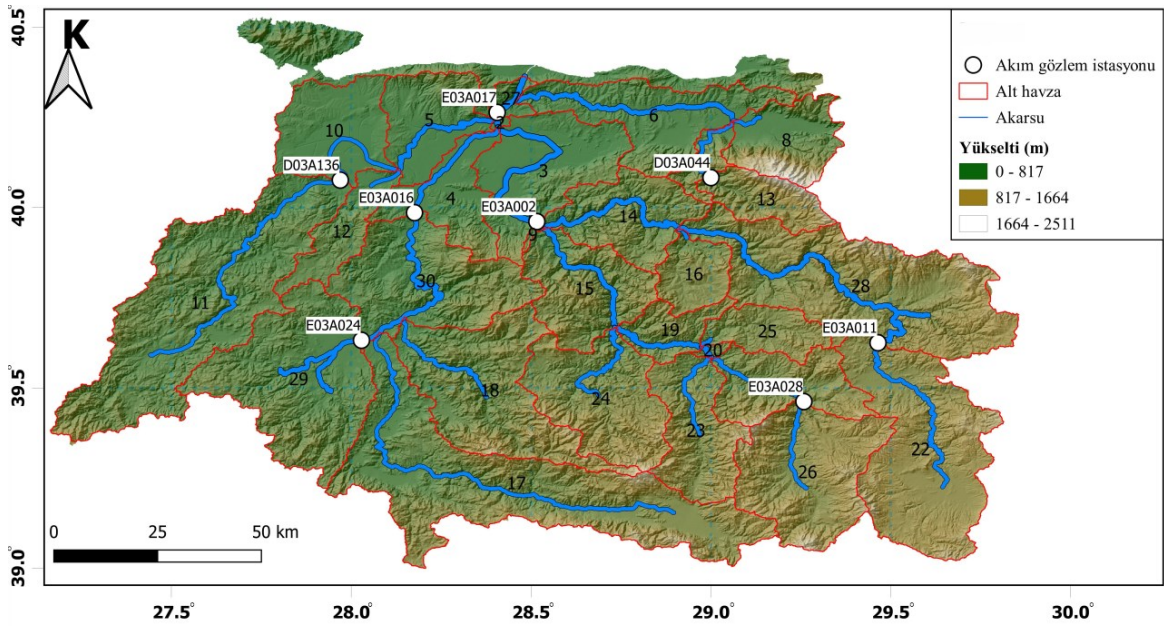
Havzayı temsil edebilecek ve uzun yıllar veriye sahip akım gözlem istasyonlarına ait veriler Devlet Su İşlerinin akım gözlem yıllıklarından (URL-17, 2023) 1979-2014 dönemi için elde edilmiştir (Tablo 6) ve konumsal gösterimleri Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 7. Susurluk Havzası'nın 2000 yılına ait arazi kullanımı (URL-18, 2023)

Tablo 6. Çalışmada kullanılan akım gözlem istasyonları ve özellikleri (DSİ, 2023c)

İstasyon numarası	Enlem (°)	Boylam (°)	Kot (m)	Ortalama akım (m ³ /s)
D03A044	40,08333	29,00000	341	4,37
D03A136	40,07528	27,96889	20	18,38
E03A002	39,96139	28,51611	40	54,22
E03A011	39,62528	29,46444	795	5,90
E03A016	39,98611	28,17611	32	117,82
E03A017	40,26417	28,40583	2	118,73
E03A024	39,63222	28,02861	94	8,86
E03A028	39,46222	29,25833	557	6,00



Şekil 8. Çalışmada kullanılan akım gözlem istasyonları, Susurluk Havzası

SWAT modeli kullanılacak olan akım veri ayrımı kurak ve yağışlı mevsimleri içinde barındıran ve iklimsel değişimleri dikkate almak için uzun eğitim dönemi seçilmesi ve model ayarlaması için iki-üç yıllık bir sürecin tercih edilmesi nedeniyle (Abbaspour vd., 2017; Peker & Sorman, 2021) 1979-1981 (%8) ısınma, 1982-2005 (%67) eğitim ve 2006-2014 (%25) test dönemi olarak belirlenmiştir.

Model kurulumu QGIS 3.16 yazılımı üzerinde SWAT modülü ile yapılmıştır. Arazi kullanımı, sayısal yükseklik modeli ve toprak verisi “WGS 1984 World Mercator” projeksiyonuna dönüştürüldükten sonra işlemlere başlanmıştır. Akarsu ağı ve alt havzalar oluştururken çok fazla alt havza oluşturmak işlem yükünü artıracığı dolayısıyla işlem süresini uzatacağı mevcut literatürde (Akbaş, 2018) tanımlanan havzalardan daha küçük alt

havza oluşacağı için makul bir değer olan 560 km² eşik değeri kullanılmış olup küçük havzalar birleştirilerek 30 adet alt havza elde edilmiştir (Şekil 8). Eğim sınıfları oluştururken [0, 5, 15, 25 ve 9999] bant eşik değerleri kullanılmış olup baskın HRU yerine full HRU tercih edilmiştir. Bunun için eğim, arazi kullanımı, toprak eşik değerleri sıfır (0) olarak seçilmiştir. Potansiyel evapotranspirasyon hesabı için sadece maksimum ve minimum sıcaklık değerleri ile hesaplanan Hargreaves metodu (Hargreaves & Samani, 1985) kullanılmıştır. Model kalibrasyonu Nguyen vd. (2022) tarafından oluşturulmuş olan “R-SWAT” programı ile 1000-1500 tekrarlı yapılarak bölgesel olarak Tablo 6’da verilen istasyonların aylık ortalama akımlar üzerinde kalibrasyonları yapılmıştır. Amaç fonksiyonu olarak NSE kullanılmıştır. Model performans değerlendirmesi NSE, PBIAS ve R² ile gerçekleştirilmiştir. PBIAS ve R² aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır:

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n x_i - y_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \quad (20)$$

$$R^2 = \left(\frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) - (y_i - \bar{y})]}{(\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 - \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2)^{0.5}} \right)^2 \quad (21)$$

Burada PBIAS, model yanlılığını ifade etmekte ve sıfır olduğunda model mükemmel olarak değerlendirilmektedir. n veri uzunluğu, x_i gözlem değeri, y_i model çıktısı, $\bar{x}$ gözlem değerlerinin ortalaması ve $\bar{y}$ model çıktı değerlerinin ortalamasıdır. R² ise belirleme katsayısıdır ve [0, 1] arasında değişmekte olup 1 en iyi değerdir. Modele senaryoların yağış ve sıcaklık verileri girilerek gelecek veriler elde edilmiştir.

Su güvenliği parametrelerinden yeşil su mevcudiyeti, kıtlığı ve hassasiyeti SWAT çıktılarından hesaplanmıştır. Mavi su mevcudiyeti SWAT çıktılarından hesaplandıktan sonra havza için su tüketim verileri elde edilemediği için tüm sektörler için ISIMIP veri tabanında senaryo tüketim verileri kullanılarak mavi su kıtlığı ve hassasiyeti hesaplanmıştır.

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Tahminleyici, Çözünürlük ve Sayısal Ağ Koşulu Seçimi Bulguları

Geleceğe yönelik tahminlerin yapılabilmesi için İÖİ modellerinin kurulumunda tahminleyicilerin belirlenmesi gerekmektedir. Öncelikle toplam yağış değerleri ile ERA5 setinde yer alan tahminleyiciler arasındaki ilişki 1979-2018 dönemi için Spearman korelasyonu kullanılarak %1 anlamlılık düzeyinde araştırılmış ve anlamlı olmayan parametreler çalışma kapsamı dışında bırakılmıştır (Tablo 7).

Tablo 7. %1 anlamlılık düzeyinde Spearman korelasyon bulguları (mutlak değerler)

Basınç seviyesi / İstasyon	<i>r</i>			<i>slp</i>	<i>tmean</i>	<i>tp</i>	<i>u</i>			<i>v</i>			<i>z</i>			<i>t</i>		
	500	700	850				500	700	850	500	700	850	500	700	850	500	700	850
S1	<i>0,35</i>	<i>0,45</i>	<i>0,57</i>	0,03	<i>0,35</i>	<i>0,57</i>	0,09	0,11	0,09	0,10	0,08	0,03	<i>0,50</i>	<i>0,51</i>	<i>0,38</i>	<i>0,43</i>	<i>0,47</i>	<i>0,45</i>
S2	<i>0,35</i>	<i>0,45</i>	<i>0,56</i>	0,06	<i>0,34</i>	<i>0,56</i>	0,10	0,12	0,10	0,12	0,10	0,05	<i>0,50</i>	<i>0,51</i>	<i>0,40</i>	<i>0,42</i>	<i>0,46</i>	<i>0,44</i>
S3	<i>0,35</i>	<i>0,44</i>	<i>0,53</i>	0,11	<i>0,31</i>	<i>0,54</i>	0,11	0,16	0,15	0,13	0,12	0,09	<i>0,49</i>	<i>0,51</i>	<i>0,42</i>	<i>0,40</i>	<i>0,44</i>	<i>0,41</i>
S4	<i>0,35</i>	<i>0,46</i>	<i>0,55</i>	0,09	<i>0,33</i>	<i>0,54</i>	0,12	0,16	0,18	0,11	0,08	0,06	<i>0,47</i>	<i>0,49</i>	<i>0,39</i>	<i>0,39</i>	<i>0,42</i>	<i>0,40</i>
S5	<i>0,37</i>	<i>0,47</i>	<i>0,58</i>	0,16	<i>0,28</i>	<i>0,56</i>	0,14	<i>0,20</i>	0,16	0,18	0,16	0,14	<i>0,45</i>	<i>0,48</i>	<i>0,43</i>	<i>0,36</i>	<i>0,39</i>	<i>0,35</i>
S6	<i>0,34</i>	<i>0,45</i>	<i>0,55</i>	0,12	<i>0,26</i>	<i>0,54</i>	0,09	0,13	0,16	0,10	0,05	0,02	<i>0,42</i>	<i>0,45</i>	<i>0,38</i>	<i>0,34</i>	<i>0,37</i>	<i>0,34</i>
S7	<i>0,37</i>	<i>0,49</i>	<i>0,56</i>	0,12	<i>0,31</i>	<i>0,55</i>	0,14	<i>0,19</i>	0,24	0,11	0,08	0,06	<i>0,47</i>	<i>0,49</i>	<i>0,40</i>	<i>0,38</i>	<i>0,42</i>	<i>0,38</i>
S8	<i>0,34</i>	<i>0,47</i>	<i>0,58</i>	0,03	<i>0,34</i>	<i>0,58</i>	0,10	0,12	0,14	0,06	0,02	0,02	<i>0,48</i>	<i>0,50</i>	<i>0,38</i>	<i>0,40</i>	<i>0,45</i>	<i>0,43</i>
S9	<i>0,37</i>	<i>0,50</i>	<i>0,61</i>	0,07	<i>0,36</i>	<i>0,56</i>	0,13	<i>0,15</i>	<i>0,21</i>	0,07	0,04	0,01	<i>0,51</i>	<i>0,53</i>	<i>0,39</i>	<i>0,42</i>	<i>0,47</i>	<i>0,45</i>

* *Kalın italik: Anlamlı*

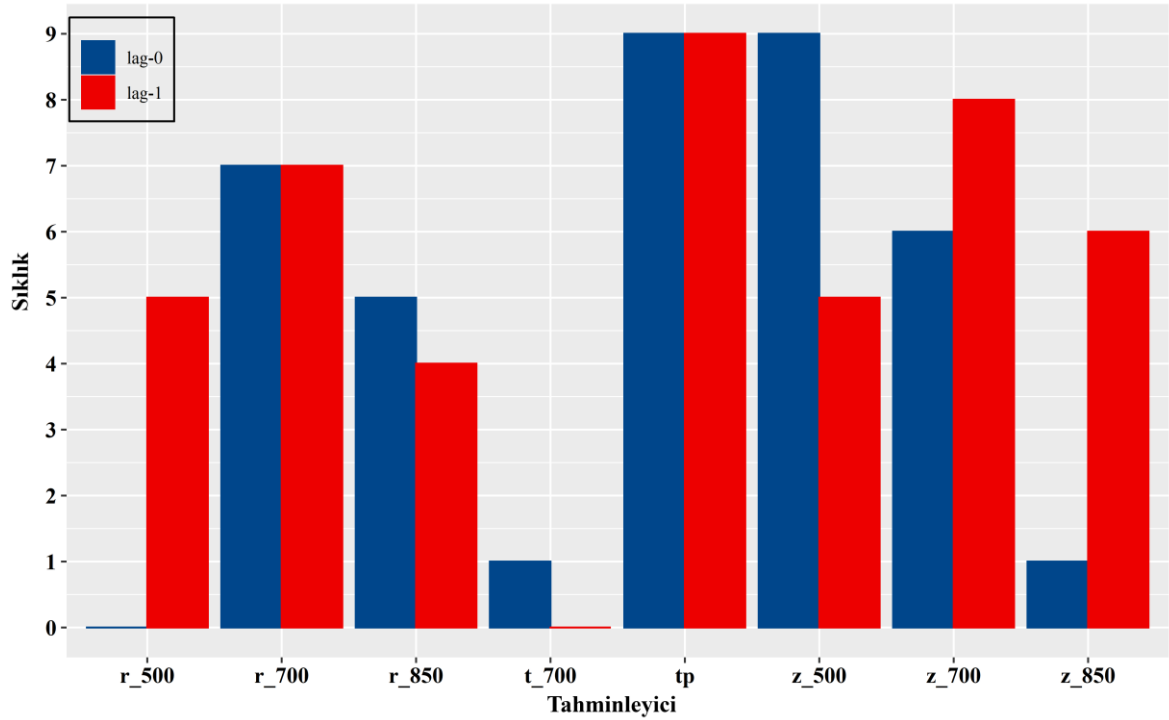
Spearman korelasyon bulguları dikkate alındığında; *u*, *v* ve *slp* tahminleyicileri genel olarak tüm istasyonlar için anlamlı bir ilişki göstermediğinden çalışmadan çıkarılmıştır. Günlük toplam yağış değerleri ile en yüksek mutlak korelasyona sahip tahminleyiciler *tp* (~0,56), *r_850* (~0,56) ve *z_700* (~0,50) olarak belirlenmiştir. Ardından, üç farklı sayısal ağ koşulu (Şekil 6a) ve 0,25°×0,25°, 1,00°×1,00°, 1,50°×1,50° ve 2,00°×2,00° çözünürlükleri (Şekil 6b) için tahmin edicilerin lag-0 ve lag-1 değerleri dikkate alınarak ve Spearman korelasyonu kullanılarak 12 tahminleyici seçilmiştir. Yukarıda bahsedilen durum farklı iklim özelliklerine sahip Susurluk Havzası için incelenmiş ve APR yöntemi kullanılarak koşullarla birlikte tahminleyici seçimi yapılmıştır. APR yönteminin temsili olarak ilk istasyon için uygulama sonuçları Tablo 8’de verilmiştir. APR yönteminde Cp için günlük değerler kullanılmıştır. Günlük yağışlar yüksek rastgelelik içerdiğinden korelasyon, yanalılık ve değişkenliğin birleşik bir ölçüsü olan NSE indeksi (Gupta vd., 2009) aylık toplam yağış için ayrıca verilmiştir.

Tablo 8. S1 istasyonu için tüm olası regresyon (APR) bulguları

n	Günlük C_p	Aylık NSE	tp	r_{500}	r_{700}	r_{850}	z_{500}	z_{700}	z_{850}	t_{500}	t_{700}	t_{850}	tm
1	2447,04	0,73	•										
2	149,33	0,79	Δ •										
3	124,42	0,79	Δ •	•									
4	91,43	0,79	Δ •	•		•							
5	65,61	0,78	Δ •	•				•	•			Δ	
6	36,68	0,78	Δ •	•			•		•			Δ	
7	16,73	0,78	Δ •	•			Δ •	Δ	•				
8	10,31	0,79	Δ •	•		Δ	Δ •	Δ	•				
9	10,35	0,79	Δ •	•		Δ	Δ •	Δ	•			Δ	
10	10,18	0,79	Δ •	•	•	Δ	Δ •	Δ	•			Δ	
11	11,62	0,79	Δ •	•		Δ •	Δ •	Δ •	•			Δ	
12	13,00	0,79	Δ •	•	•	Δ •	Δ •	Δ •	•			Δ	

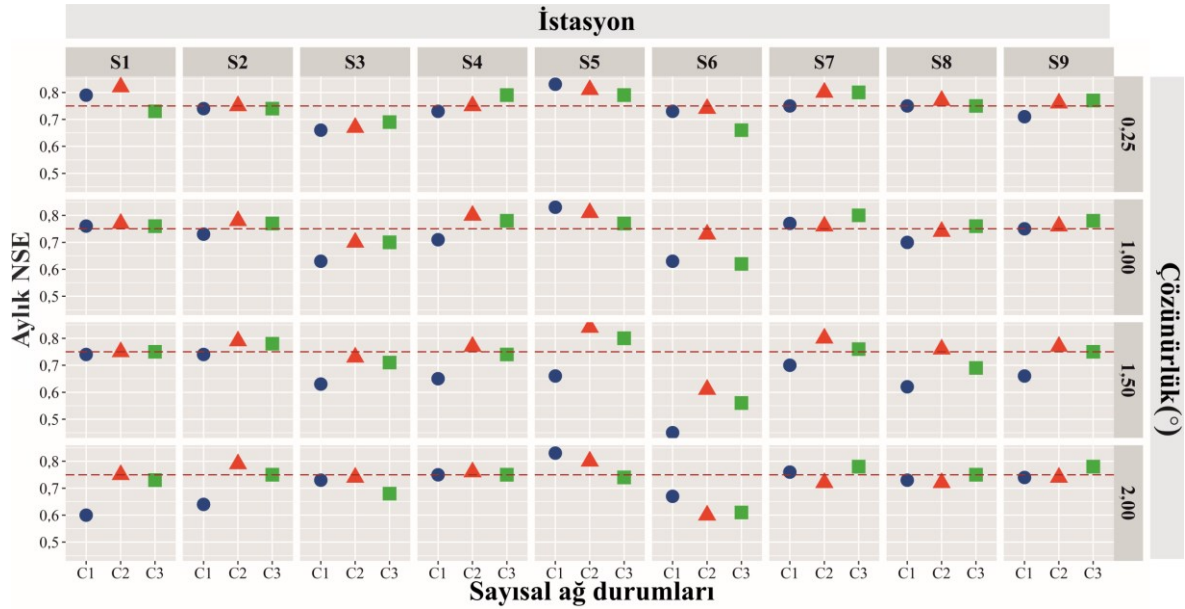
•: lag-1 değeri, Δ : lag-0 değeri

Tablo 8’de C_p değeri, $n = 8$ olduğunda hızlı bir düşüş yapmış daha sonra ise artmıştır. Girdi değişkeni sayısı için “ $C_p \cong n + 1$ ” değerinin tercih edilmesi önerilmektedir. Bu durumun gerçekleşmediği durumlarda ise C_p ’nin en küçük değeri en uygun model olarak değerlendirilmektedir (Pardoe, 2013; URL-16, 2021). Bu nedenle ilk istasyon için dokuz değişken seçilmiştir. Havzada yağış tahmini için belirlenen tahminci frekansları Şekil 9’da verilmektedir.



Şekil 9. Tüm olası regresyon yöntemine göre tahminleyici sıklığı

Şekil 9’da görüldüğü üzere havzadaki ölçek küçültme modeli için en sık kullanılan tahminleyiciler sırasıyla tp , z_500 , r_700 ve z_700 ’dür. APR yöntemi ile tahminleyici seçimi yapıldıktan sonra sayısal koşulları ve çözünürlük seçimleri aylık NSE değerleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Aylık NSE değerlerine göre sayısal ağ durumu ve çözünürlük belirleme (kırmızı kesikli çizgi 0,75 NSE değerine karşılık gelmektedir)

Şekil 10’da C1 genel olarak tüm istasyonlardaki tüm durumlar için en kötü performansı gösterdiği görülmektedir. C2 ve C3 ise tüm sayısal ağ çözünürlükleri için birbirine yakın performanslar göstermişlerdir. Ancak C3, C1’e kıyasla çoğunlukla daha iyi performans göstermesine rağmen, tüm sayısal ağ çözünürlükleri dikkate alındığında C2 kadar istikrarlı ve iyi performans göstermemiştir. NSE değeri 0,75’e (> çok iyi performans) karşılık gelen kırmızı kesikli çizgi daha kolay karar vermek için dahil edilmiştir. Tüm sayısal ağ çözünürlüklerinde ve koşullarında NSE=0,75’in altında performansa sahip olan S3 (NSE=0,73) ve S6 (NSE=0,61) istasyonlar dışında, C2’nin $1,50^{\circ} \times 1,50^{\circ}$ çözünürlüğünde NSE değerinin 0,75’in altına inmediği görülmüştür. Bu nedenle ve CMIP6’daki GDM çözünürlükleri ortalaması yaklaşık $1,50^{\circ} \times 1,50^{\circ}$ olduğu için C2 durumu ve $1,50^{\circ} \times 1,50^{\circ}$ sayısal ağ çözünürlükleri seçilmiştir. Dolayısıyla, uzun mesafedeki sayısal ağların yağışı etkili bir şekilde tahmin etmeye yardımcı olduğu söylenebilir (Wilby & Wigley, 2000; Crawford vd., 2007; Borges vd., 2017).

3.2. İstatistiksel Ölçek İndirgeme Modellerine Ait Performans Bulguları

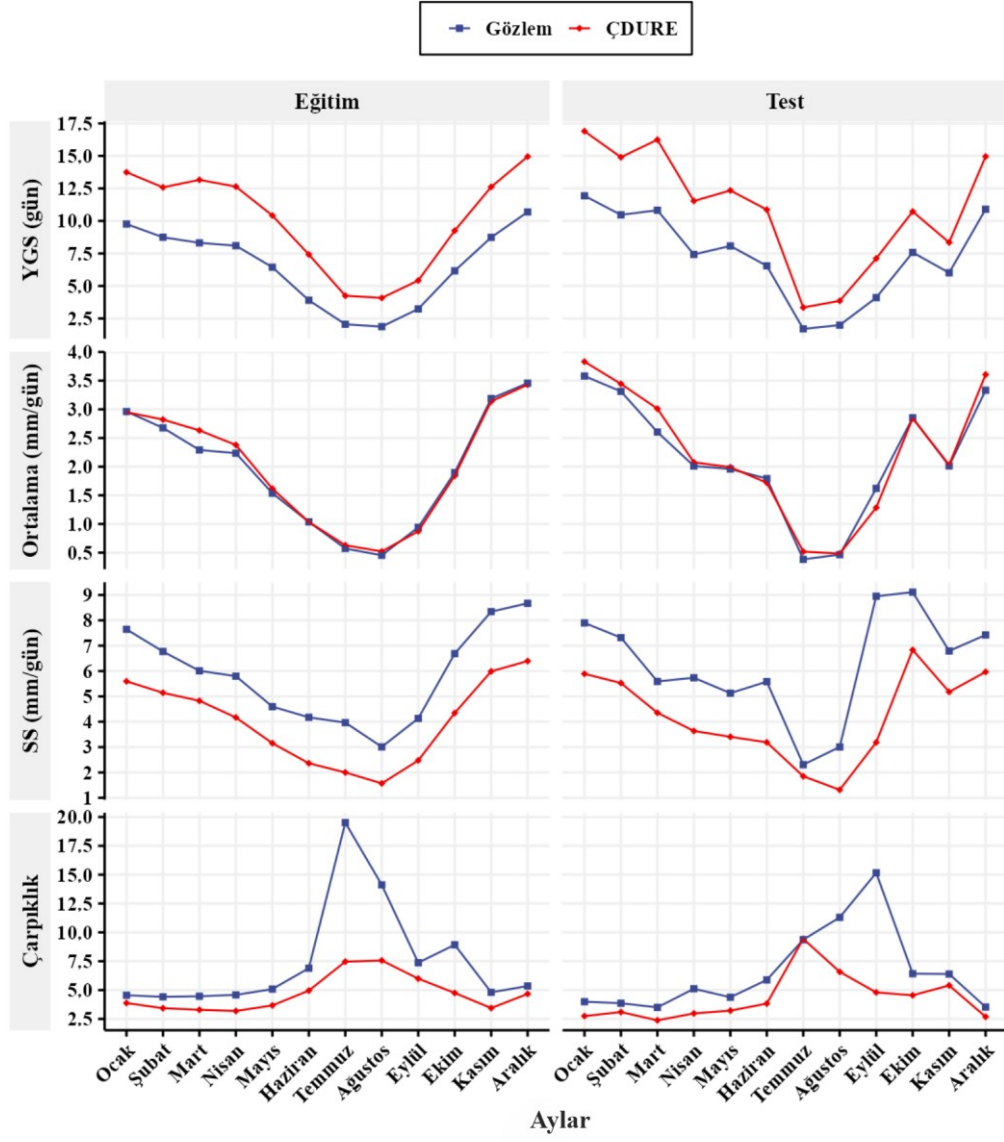
En uygun tahminleyiciler, sayısal ağ durumları ve ERA5 veri seti çözünürlüğü belirlendikten sonra İÖİ modellerinin kurulumu aşamasına geçilmiştir. İÖİ modelleri kurulumu yağışlı ve kuru gün sınıflandırması yapılmadan doğrudan yağış miktarlarıyla yapılmıştır. Bunun için yağışlı ve kuru gün tanımı yapılırken yağışın ≥ 1 mm olması durumunda yağışlı gün ve < 1 mm olması durumunda ise kuru gün olarak kabul edilmiştir. ÇDURE ile yapılan İÖİ modellerinin yağışlı ve kuru günleri yakalama durumları Tablo 9’da, aylık ortalama yağışlı günlerin sayısı (YGS) Şekil 11’de ve eğitim ve test dönemleri için istatistiki değer bulguları Tablo 10’da verilmektedir.

Tablo 9. Yağışlı ve kurak günler için tutarlılık bulguları

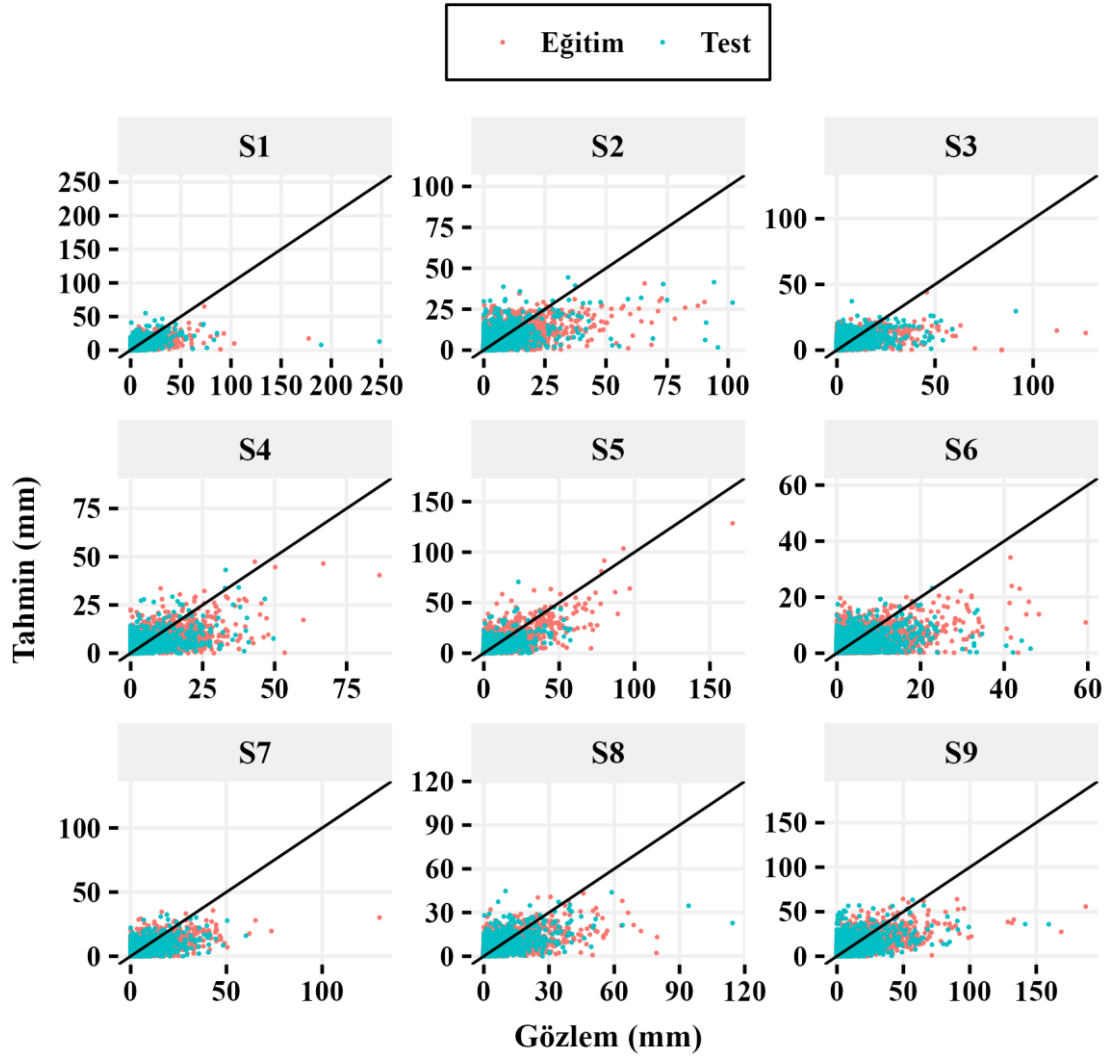
İstasyon	Eğitim					Test				
	KK	KY	YK	YY	DO	KK	KY	YK	YY	DO
S1	6755	1935	237	2030	0,80	2237	563	91	761	0,82
S2	7469	1330	333	1825	0,85	2332	481	117	722	0,84
S3	7643	1449	206	1659	0,85	2373	557	53	669	0,83
S4	7236	1624	238	1859	0,83	2290	586	81	695	0,82
S5	7437	1319	277	1924	0,85	2365	414	126	747	0,85
S6	7491	1362	460	1644	0,83	2322	484	179	667	0,82
S7	6475	1891	287	2304	0,80	2063	658	93	838	0,79
S8	6836	1753	195	2173	0,82	2185	611	50	806	0,82
S9	5313	2236	237	3171	0,77	1770	698	138	1046	0,77

Tablo 9’a göre her iki dönem için gerçekte yağışlı gün modelde kuru gün (YK) ve gerçekte kuru gün modelde yağışlı gün (KY) değerleri düşük olmasının yanında gerçekte kuru gün iken modelde de kuru gün (KK) ve gerçekte yağışlı gün iken modelde de yağışlı gün (YY) değerleri de diğerlerine göre oldukça yüksek olup bu da DO değerlerinin yüksek olmasını ($> 0,75$) sağlamıştır. DO ortalama olarak eğitim ve test dönemleri için yaklaşık 0,82 değerini alması modellerin bu konuda oldukça yüksek başarı sağladığını göstermektedir. Havzadaki aylık ortalama yağışlı günlerin sayısına bakıldığında ÇDURE modeli ile gözleme dayalı verilerden daha yüksek miktarda yağışlı gün belirlenmiştir (Şekil 11). Bunun nedeninin ERA5 yağış verilerinin yanlışlık içermesinden ve çiseleme etkisinden dolayı olduğu düşünülmektedir (Gutowski vd., 2003; Maraun, 2016; Amjad vd., 2020). Tablo 10Tablo 10 ve Şekil 11’e göre ortalama yağış miktarları tahmin performansına bakıldığında, model değerlerinin gözlem değerlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Standart sapma (SS) değerleri ise gözlem değerlerinden biraz düşük ve aylar arasında gözlemle aynı

örüntüye sahip olarak tahmin edilmiştir. Çarpıklık değerleri ise gözleme oldukça yakın ancak eğitim döneminde Temmuz ve Ağustos ile test döneminde Ağustos ve Eylül aylarında gözlemden diğer aylara nazaran yüksek değerler almıştır. Bunun nedeni ise bu aylarda oldukça düşük yağış ortalaması varken nadir uç yağışların gerçekleşmesidir. Tablo 10'a bakıldığında NSE değeri bakımından her iki dönem için yaklaşık 0,4'e yakın değerler almıştır. KGES değeri ise her iki dönem için genel olarak sıfırdan yüksek ve ortalama 0,5 değer almasıyla ortalama, SS ve çarpıklık değerlerini yaklaşık aynı başarı ile tahmin etmiştir. Model sonuçları ile gözlem verilerinin günlük toplam yağış değerleri için elde edilen saçılım grafikleri Şekil 12'de verilmektedir. Buna göre düşük hata değerlerine sahip modellerde veriler genel olarak 1:1 doğrusu etrafında toplanmıştır. Yüksek hata değerlerine sahip modellerde ise genellikle gözleme göre düşük tahmin değerleri ortaya çıkmıştır. Sıcaklık değerine göre yağış verilerinin model ve gerçek veriler arasındaki uyumunun düşük olması yağışın zamansal ve mekânsal olarak değişkenliğinin fazla olması ve yağışı etkileyen unsurların belirsizliğinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 11. İstatistiksel ölçek indirgeme model sonuçlarının aylık istatistiki değerlerinin değişimi



Şekil 12. İstatistiksel ölçek indirgeme model sonuçlarının günlük toplam yağış için saçılım grafikleri

Tablo 10. Günlük toplam yağış verilerinin ÇDURE model bulguları

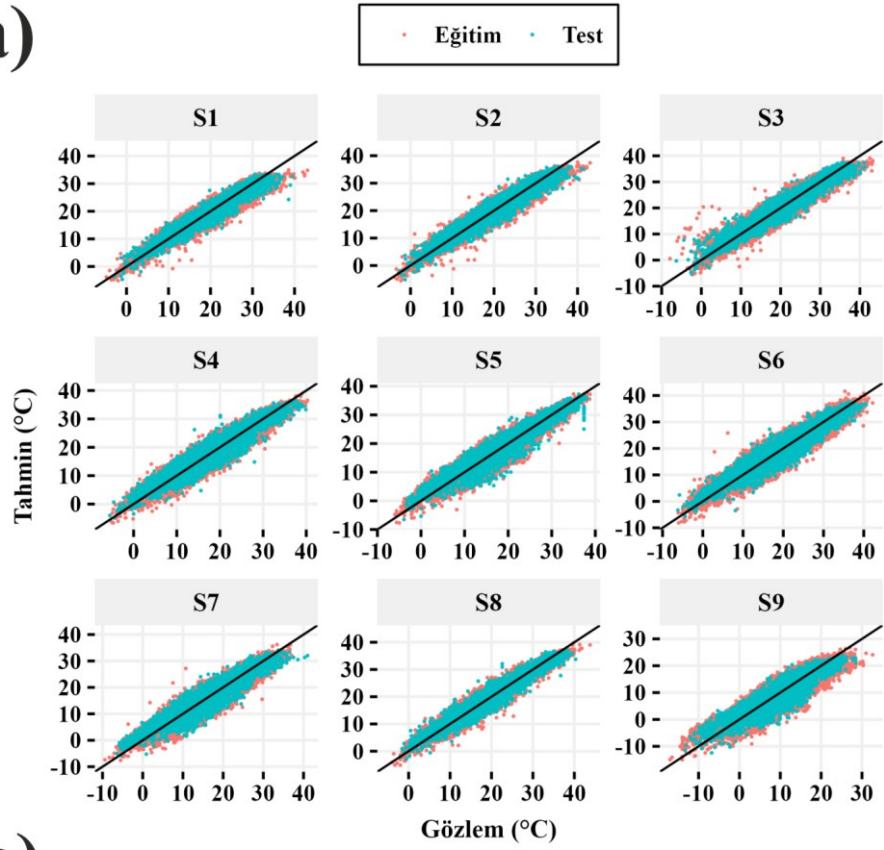
İstasyon	Parametre	Eğitim		Test	
		Gözlem	ÇDURE	Gözlem	ÇDURE
S1	Ortalama	1,86	1,99	2,27	2,53
	SS	6,09	3,89	8,21	5,09
	Çarpıklık	7,51	3,64	13,27	3,40
	KGES	-	0,37	-	0,16
	NSE	-	0,43	-	0,27
S2	Ortalama	1,77	1,78	2,15	2,23
	SS	5,66	3,85	6,75	4,71
	Çarpıklık	5,92	3,37	6,88	3,41
	KGES	-	0,46	-	0,41
	NSE	-	0,46	-	0,38
S3	Ortalama	1,47	1,51	1,85	1,89
	SS	5,13	3,20	5,79	3,70
	Çarpıklık	7,33	3,26	5,31	3,12
	KGES	-	0,33	-	0,45
	NSE	-	0,39	-	0,42
S4	Ortalama	1,48	1,51	1,68	1,69
	SS	4,50	3,11	4,69	3,25
	Çarpıklık	5,27	4,35	4,32	4,07
	KGES	-	0,64	-	0,69
	NSE	-	0,48	-	0,38
S5	Ortalama	2,06	2,07	1,92	1,92
	SS	6,88	5,51	5,48	4,17
	Çarpıklık	6,53	6,32	4,86	5,23
	KGES	-	0,80	-	0,75
	NSE	-	0,64	-	0,45
S6	Ortalama	1,27	1,27	1,51	1,51
	SS	3,77	2,38	4,03	2,39
	Çarpıklık	5,12	3,51	4,51	2,99
	KGES	-	0,52	-	0,47
	NSE	-	0,40	-	0,29
S7	Ortalama	1,96	2,08	2,12	2,25
	SS	5,35	3,68	5,44	3,80
	Çarpıklık	5,15	2,81	4,00	2,71
	KGES	-	0,45	-	0,55
	NSE	-	0,50	-	0,42
S8	Ortalama	1,86	2,01	2,25	2,51
	SS	5,47	3,79	6,43	4,68
	Çarpıklık	5,15	3,27	5,57	3,19
	KGES	-	0,52	-	0,48
	NSE	-	0,51	-	0,47
S9	Ortalama	3,96	4,18	3,98	4,43
	SS	9,98	7,09	10,19	7,66
	Çarpıklık	4,82	2,71	5,08	2,78
	KGES	-	0,47	-	0,47
	NSE	-	0,53	-	0,34

Yapılan ön incelemelerde çok tahminleyici ile sadece yüzey sıcaklık tahminleyicisi kullanımları arasında anlamlı fark olmadığı ve genellikle sıcaklık değerleri yüksek performansla elde edildiği (Okkan & Kirdemir, 2016; Nacar, 2020) belirlenmiştir. Bu nedenle günlük maksimum ve minimum sıcaklık parametreleri için kurulan İÖİ modellerinde sadece yüzey sıcaklık parametresi tahminleyici olarak kullanılmıştır. Model bulguları Tablo 11’de ve saçılım grafikleri Şekil 13’te verilmektedir.

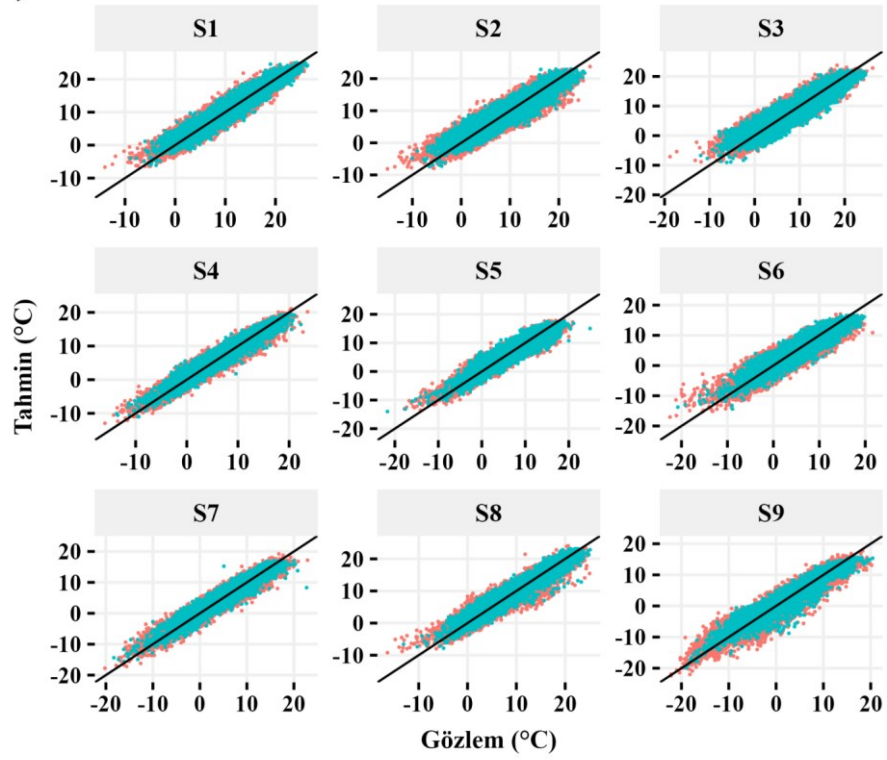
Tablo 11. Maksimum ve minimum sıcaklıkların ÇDURE model performans bulguları

İstasyon	Parametre	Maksimum sıcaklık				Minimum sıcaklık			
		Eğitim		Test		Eğitim		Test	
		Gözlem	ÇDURE	Gözlem	ÇDURE	Gözlem	ÇDURE	Gözlem	ÇDURE
S1	Ortalama	18,54	18,54	19,62	19,62	10,17	10,17	11,51	11,51
	SS	8,31	7,99	8,08	7,77	7,19	6,83	7,42	7,04
	Çarpıklık	-0,18	-0,27	-0,22	-0,26	-0,05	-0,02	-0,03	0,00
	KGES		0,53		0,82		0,42		-0,08
	NSE		0,93		0,93		0,90		0,92
S2	Ortalama	19,78	19,78	21,07	21,07	8,67	8,67	9,95	9,96
	SS	8,86	8,57	8,66	8,36	6,92	6,26	7,05	6,39
	Çarpıklık	-0,19	-0,24	-0,25	-0,23	-0,10	-0,05	-0,10	-0,03
	KGES		0,74		0,93		0,47		0,29
	NSE		0,94		0,93		0,82		0,85
S3	Ortalama	20,38	20,38	21,36	21,36	8,95	8,95	9,21	9,22
	SS	9,43	9,09	9,37	9,03	7,15	6,62	7,23	6,70
	Çarpıklık	-0,18	-0,23	-0,25	-0,22	-0,15	-0,07	-0,12	-0,05
	KGES		0,75		0,86		0,46		0,42
	NSE		0,93		0,94		0,86		0,83
S4	Ortalama	18,45	18,45	19,58	19,58	7,07	7,07	7,69	7,70
	SS	9,37	9,02	9,26	8,91	6,79	6,54	6,71	6,45
	Çarpıklık	-0,14	-0,12	-0,18	-0,11	-0,26	-0,25	-0,26	-0,24
	KGES		0,83		0,63		0,95		0,91
	NSE		0,93		0,92		0,93		0,93
S5	Ortalama	18,52	18,52	19,75	19,75	5,78	5,78	6,60	6,63
	SS	9,39	9,05	9,22	8,89	6,43	6,02	6,37	5,97
	Çarpıklık	-0,17	-0,12	-0,17	-0,12	-0,29	-0,34	-0,35	-0,36
	KGES		0,70		0,71		0,83		0,94
	NSE		0,93		0,92		0,88		0,86
S6	Ortalama	18,75	18,75	19,67	19,67	4,42	4,42	5,90	5,90
	SS	10,04	9,59	9,58	9,15	6,79	6,24	6,72	6,17
	Çarpıklık	-0,12	-0,14	-0,18	-0,13	-0,33	-0,33	-0,31	-0,32
	KGES		0,85		0,72		0,92		0,90
	NSE		0,91		0,91		0,85		0,85
S7	Ortalama	15,62	15,62	16,87	16,87	4,59	4,59	5,33	5,34
	SS	9,11	8,65	9,07	8,60	6,75	6,47	6,56	6,28
	Çarpıklık	-0,13	-0,10	-0,17	-0,09	-0,33	-0,35	-0,34	-0,35
	KGES		0,74		0,53		0,93		0,95
	NSE		0,90		0,89		0,92		0,92
S8	Ortalama	20,26	20,26	21,39	21,40	9,08	9,08	10,29	10,30
	SS	9,01	8,76	8,73	8,47	6,83	6,43	7,06	6,64
	Çarpıklık	-0,19	-0,18	-0,24	-0,18	-0,16	-0,12	-0,15	-0,11
	KGES		0,97		0,75		0,75		0,69
	NSE		0,95		0,94		0,89		0,90
S9	Ortalama	8,77	8,77	9,48	9,46	1,67	1,67	2,96	2,96
	SS	8,47	7,80	7,95	7,33	7,49	7,08	7,22	6,82
	Çarpıklık	-0,06	-0,04	-0,11	-0,03	-0,28	-0,27	-0,27	-0,27
	KGES		0,59		0,27		0,93		0,94
	NSE		0,85		0,85		0,89		0,89

a)



b)



Şekil 13. Günlük a) maksimum ve b) minimum sıcaklık model sonuçlarının saçılım grafikleri

Tablo 11 ve Şekil 13'e göre model değerleri ile gözlem verilerinin ortalama, SS ve çarpıklık değerlerinin birbirine oldukça yakın değerler aldığı görülmektedir. Maksimum ve minimum sıcaklık için eğitim ve test dönemlerinde ortalama NSE değerleri 0,92 ve 0,89 olarak hesaplanmıştır. İÖİ model kurulum bulgularına göre günlük toplam yağış, günlük minimum ve maksimum sıcaklık değerleri genel olarak başarılı sonuçlar vermiştir. Bu nedenle geleceğe yönelik değerlerin elde edilmesinde kurulmuş modeller kullanılmıştır.

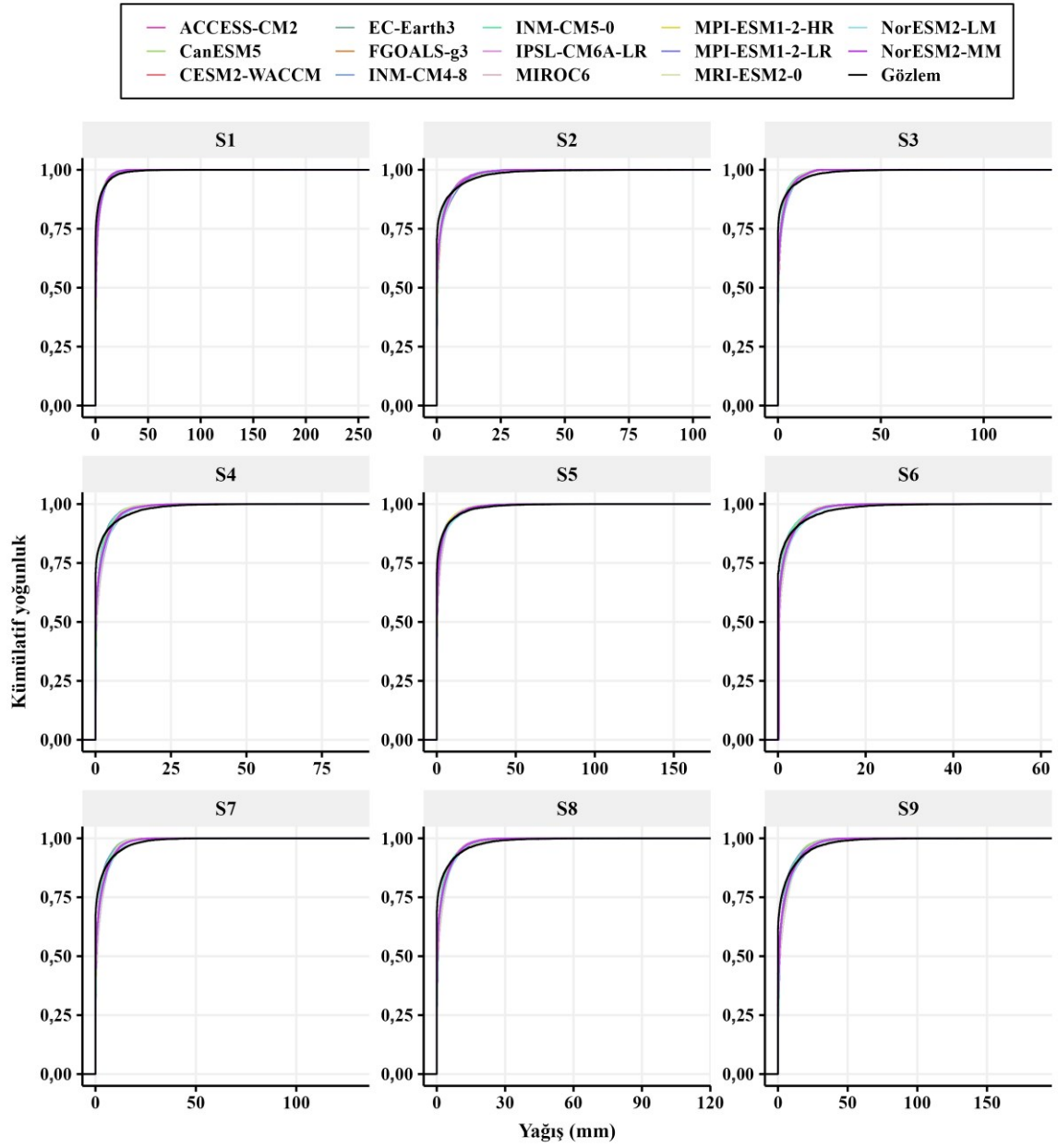
3.3. Genel Dolaşım Modellerinin Belirlenmesi ve Çoklu Model Topluluğu Ortalamaları

ERA5 verileri ile gözlem yağış ve sıcaklık verileri İÖİ modelleri kurulduktan sonra; geçmiş, SSP1-2.6, SSP3-7.0, ve SSP5-8.5 senaryoları ve İÖİ modelleri kurulumunda kullanılan 12 girdi değişkenlerini barındıran GDM'ler CMIP6 arşivinde taranmıştır. Belirlenen GDM'ler ve çözünürlükleri Tablo 12'de verilmektedir.

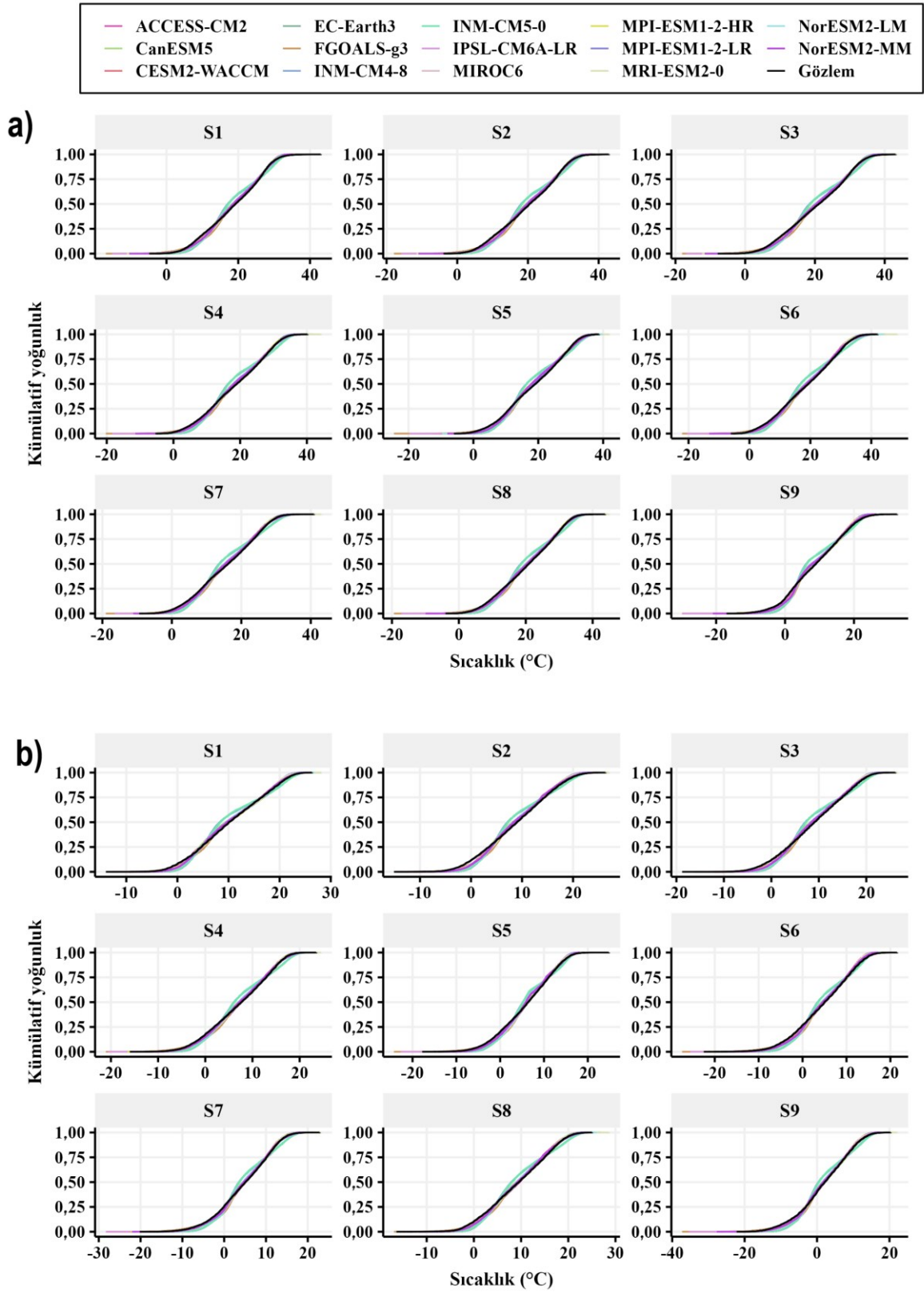
Tablo 12. Çalışmadan kullanılan genel dolaşım modelleri ve çözünürlükleri

GDM	Çözünürlük	GDM	Çözünürlük
ACCESS-CM2	$1,87^{\circ} \times 1,25^{\circ}$	IPSL-CM6A-LR	$1,26^{\circ} \times 2,50^{\circ}$
CanESM5	$2,81^{\circ} \times 2,81^{\circ}$	MIROC6	$1,40^{\circ} \times 1,40^{\circ}$
CESM2-WACCM	$1,30^{\circ} \times 0,90^{\circ}$	MPI-ESM1-2-HR	$0,94^{\circ} \times 0,94^{\circ}$
EC-Earth3	$0,35^{\circ} \times 0,35^{\circ}$	MPI-ESM1-2-LR	$1,90^{\circ} \times 1,90^{\circ}$
FGOALS-g3	$2,00^{\circ} \times 2,00^{\circ}$	MRI-ESM2-0	$1,10^{\circ} \times 1,10^{\circ}$
INM-CM4-8	$2,00^{\circ} \times 1,50^{\circ}$	NorESM2-LM	$2,50^{\circ} \times 1,89^{\circ}$
INM-CM5-0	$2,00^{\circ} \times 1,50^{\circ}$	NorESM2-MM	$0,94^{\circ} \times 1,25^{\circ}$

Tablo 12'de verilen GDM'lere ait değişkenler ÇDURE modellerine standardize edilerek girilmiş ve 1979-2014 dönemi için günlük toplam yağış ile günlük maksimum ve minimum sıcaklık değerleri tahmin edilmiştir. Sonuçlara ait KYF fonksiyonları karşılaştırması yağış için Şekil 14'te ve sıcaklıklar için Şekil 15'te verilmektedir.



Şekil 14. Genel dolaşım modellerinin istatistiksel ölçek indirgenmiş günlük yağış verileri için kümülatif yoğunlukları



Şekil 15. Genel dolaşım modellerinin istatistiksel ölçek indirgenmiş günlük maksimum (a) ve minimum (b) sıcaklık verileri için kümülatif yoğunluklular

Gözlem verileri ile GDM'lerin İÖİ yağış değerleri arasında belirli derecede uyum olsa da özellikle yüksek değerlerde yanlışlıklar olduğu Şekil 14'te görülmektedir. Günlük maksimum ve minimum sıcaklık verileri için yanlışlıklar, orta ve düşük değerlerde daha fazla görülmektedir. Bu nedenle KGE ve DO kullanılarak hidrolojik modellerin girdi belirsizliği diğer değişkenlere kıyasla yüksek olan yağışlar için GDM'ler arasında bir sıralama yapılmıştır. Bunun için GDM yağış değerleri ile gözlem verileri arasında KGE günlük ve aylık toplam yağışlar için hesaplanıp havza ortalaması alınmış ve yine günlük toplam yağışlar özelinde DO hesaplanıp havza ortalaması alınmıştır. Ardından her bir GDM her bir kritere göre sıralanmış olup sıra ortalaması alınarak havzayı performans açısından temsil eden GDM'ler sıralanmıştır (Tablo 13).

Tablo 13. Genel dolaşım modellerinin performansları ve sıralamaları

GDM	Günlük KGE	Sıra	Aylık KGE	Sıra	DO	Sıra	Bütüncül Sıra
MPI-ESM1-2-LR	0,006	1	0,435	3	0,645	1	1
CESM2-WACCM	-0,007	3	0,454	1	0,632	4	2
MPI-ESM1-2-HR	-0,007	4	0,422	4	0,638	2	3
INM-CM5-0	-0,006	2	0,408	5	0,619	8	4
NorESM2-LM	-0,013	5	0,366	9	0,636	3	5
CanESM5	-0,023	10	0,438	2	0,623	6	6
NorESM2-MM	-0,022	9	0,403	6	0,627	5	7
EC-Earth3	-0,020	6	0,402	7	0,617	9	8
MIROC6	-0,022	8	0,354	10	0,621	7	9
INM-CM4-8	-0,020	7	0,380	8	0,613	10	10
MRI-ESM2-0	-0,026	11	0,350	11	0,603	12	11
FGOALS-g3	-0,030	13	0,339	12	0,593	13	12
IPSL-CM6A-LR	-0,027	12	0,296	13	0,590	14	13
ACCESS-CM2	-0,032	14	0,261	14	0,607	11	14

Kahın: Performans değerine bağlı olarak en iyi dört GDM

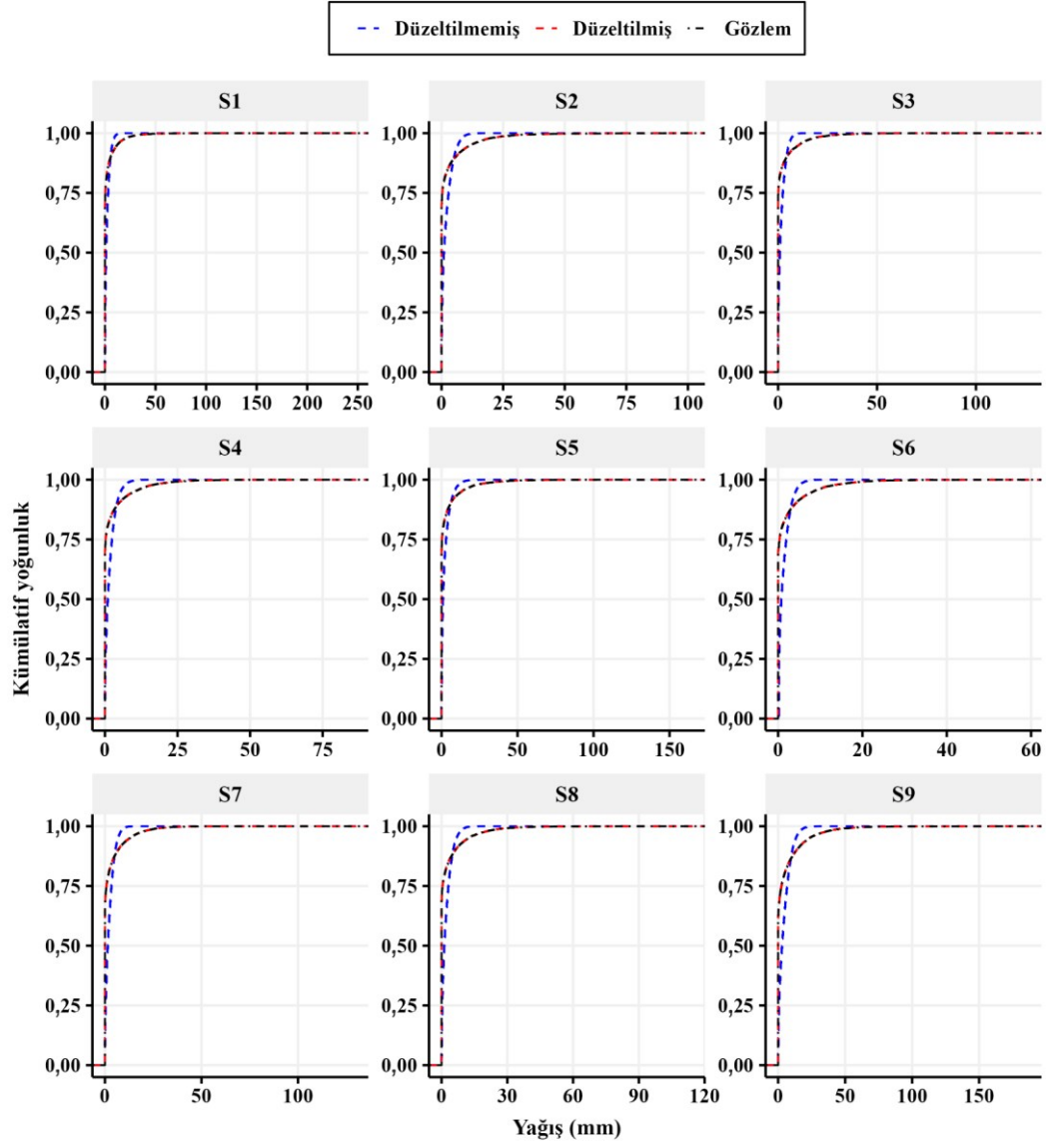
Tablo 13'e göre günlük KGE değeri sıfırdan yüksek sadece MPI-ESM1-2-LR modelidir ancak CESM2-WACCM, MPI-ESM1-2-HR ve INM-CM5-0 modelleri birbirlerinden çok farklı olmayıp sıfıra çok yakın değerler almıştır. Yüksek performansa sahip GDM'ler için aylık KGE değerleri genellikle 0,400'ten büyük çıkmıştır. En iyi performans gösteren GDM'lerde BO değeri genellikle 0,63'ün üzerinde değerler almıştır. Yapılan hesaplamalara göre havza için MPI-ESM1-2-LR en iyi performans gösterirken ACCESS-CM2 en kötü performans göstermiştir. GDM'lerin barındırdığı olası belirsizlikleri azaltmak için gerçek verilerle uyumu en yüksek ilk üç-dört GDM verileri ÇMTO halinde dikkate alınmaktadır (Ahmed vd., 2019; Bağcı vd., 2021). Bu nedenle en iyi performans gösteren sırasıyla MPI-ESM1-2-LR, CESM2-WACCM, MPI-ESM1-2-HR ve INM-CM5-0 modellerinin yağış ve sıcaklık değerlerinin hem referans hem de gelecek senaryo verileri

için ortalamaları alınmıştır. Sonuç olarak her bir istasyonda yağış ve sıcaklık parametreleri için bir referans gelecek üç senaryo verisi elde edilmiştir.

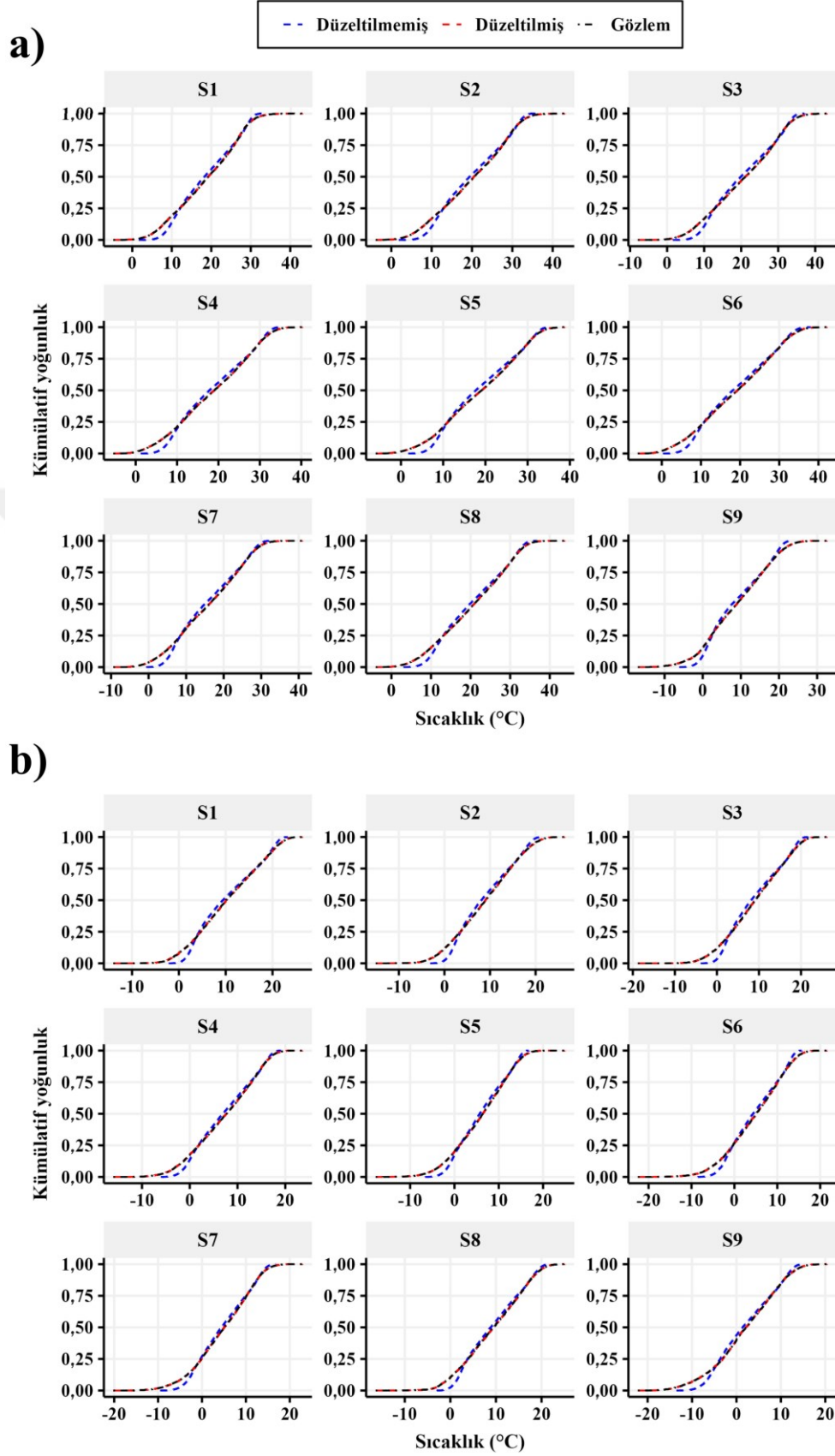
3.4. Gelecek Senaryo Verilerinin Üretimi ve Yanlılık Düzeltme Süreci

Bir önceki aşamada seçilmiş olan dört GDM'nin gelecek senaryo verileri üretilirken girdi değişkenleri standardize edilerek kurulmuş olan ÇDURE modellerine girilmiştir. GDM'lerin referans dönem ortalama ve SS değerleri kullanılarak ters standardize işlemi yapılmış ve çıktı değişkenleri elde edilmiştir. Ardından tüm senaryolar için ÇMTO değerleri hesaplanmıştır. GDM verileri içerdiği sistematik yanlılıklarından dolayı mevsimselliği de yakalama amacıyla her ay için KDH yöntemi referans ve gelecek senaryo verilerine birlikte uygulanmıştır. Referans dönem için ÇMTO verilerinin yanlılık düzeltilmemiş ve düzeltilmiş durumlarına ait kümülatif yoğunlukları yağış için Şekil 16 ve sıcaklıklar için Şekil 17'de verilmektedir.

Şekil 16'ya göre yağış verilerinin yüksek değerlerinde, Şekil 17'ye göre maksimum ve minimum sıcaklıkların düşük değerlerinde gözlem verileriyle arasındaki yanlılıklar KDH yöntemi uygulanması sonrasında büyük ölçüde giderilmiştir. KDH yöntemi referans dönem ile gelecek senaryolara birlikte uygulanarak gelecek senaryo yağış ve sıcaklık verileri elde edilmiştir.



Şekil 16. Günlük yağış verileri için yanlışlık düzeltme bulguları

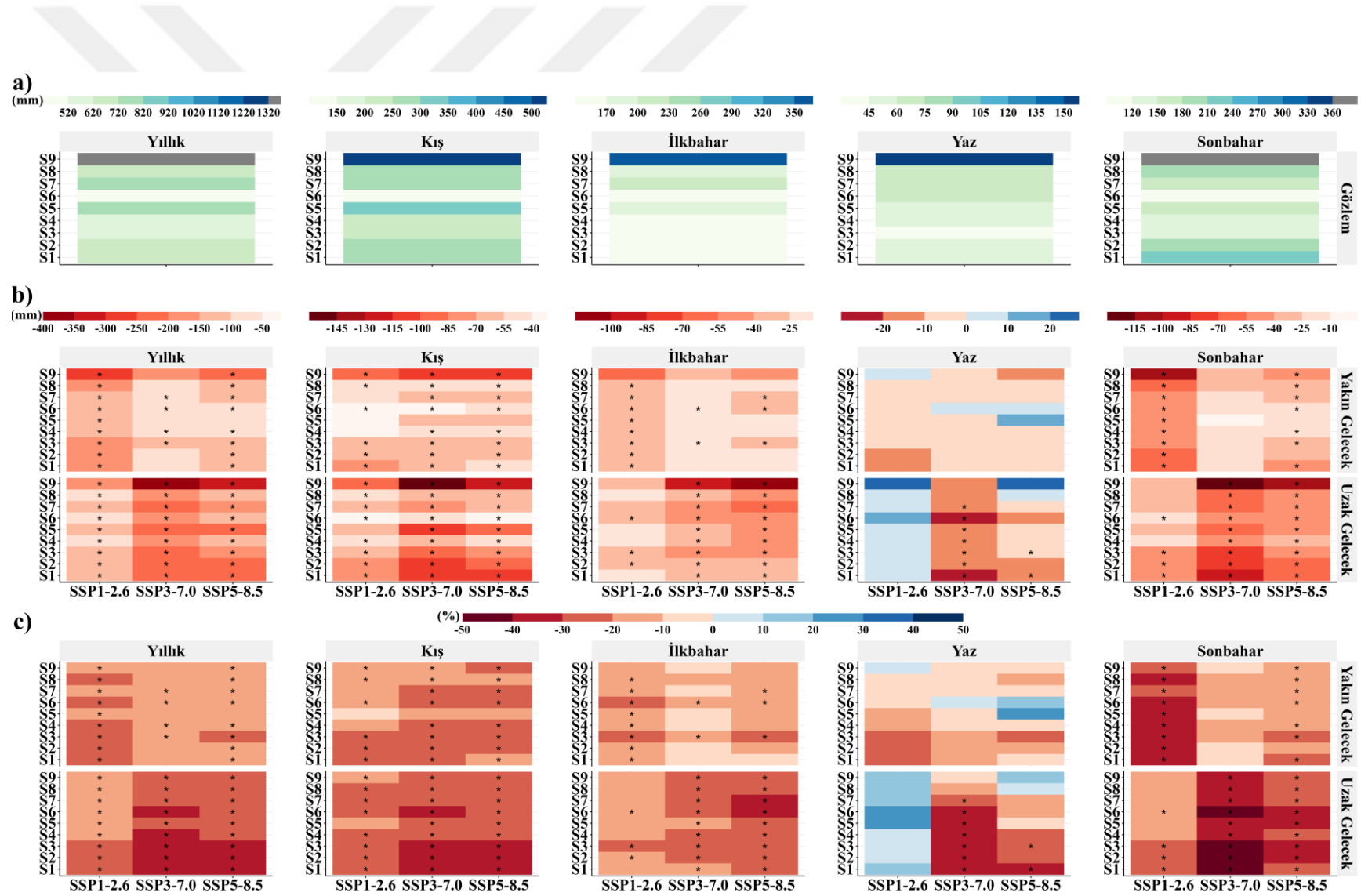


Şekil 17. Günlük (a) maksimum ve (b) minimum sıcaklık verileri için yanlılık düzeltme bulguları

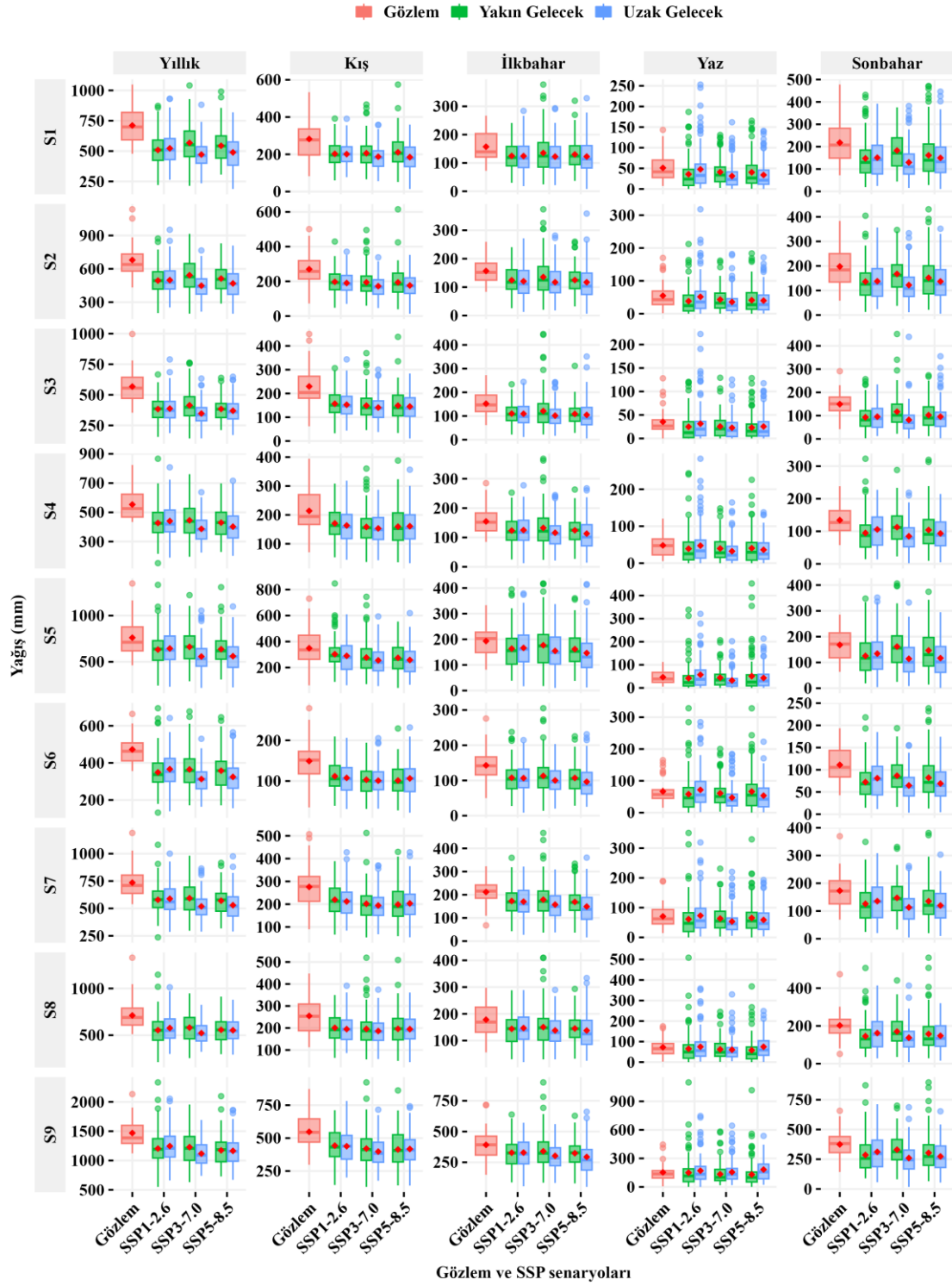
3.5. Gelecek Dönem Yağış ve Sıcaklık Verilerinin Gözlem Verilerine Göre Değişimlerinin İncelenmesi

Bir önceki aşamada ÇMTO hesaplanmış ve yanlılığı giderilmiş geleceğe yönelik olası günlük toplam yağış, günlük maksimum ve minimum sıcaklık senaryo verilerinin gözlem dönemine (1979-2014) göre olası değişimleri, kısa ve uzun vadede incelemek amaçlı yakın gelecek (2030-2059) ve uzak gelecek (2070-2099) olarak iki döneme bölünmüştür. Yıllık ve mevsimlik toplam yağış dönemsel ortalama ve değişim miktarları Şekil 18 ve Şekil 19’de verilmektedir. Ortalamalardaki değişimlerin anlamlılıklarını test etmek amaçlı Wilcoxon testi (Wilcoxon, 1945) %5 anlamlılık düzeyinde kullanılmıştır.

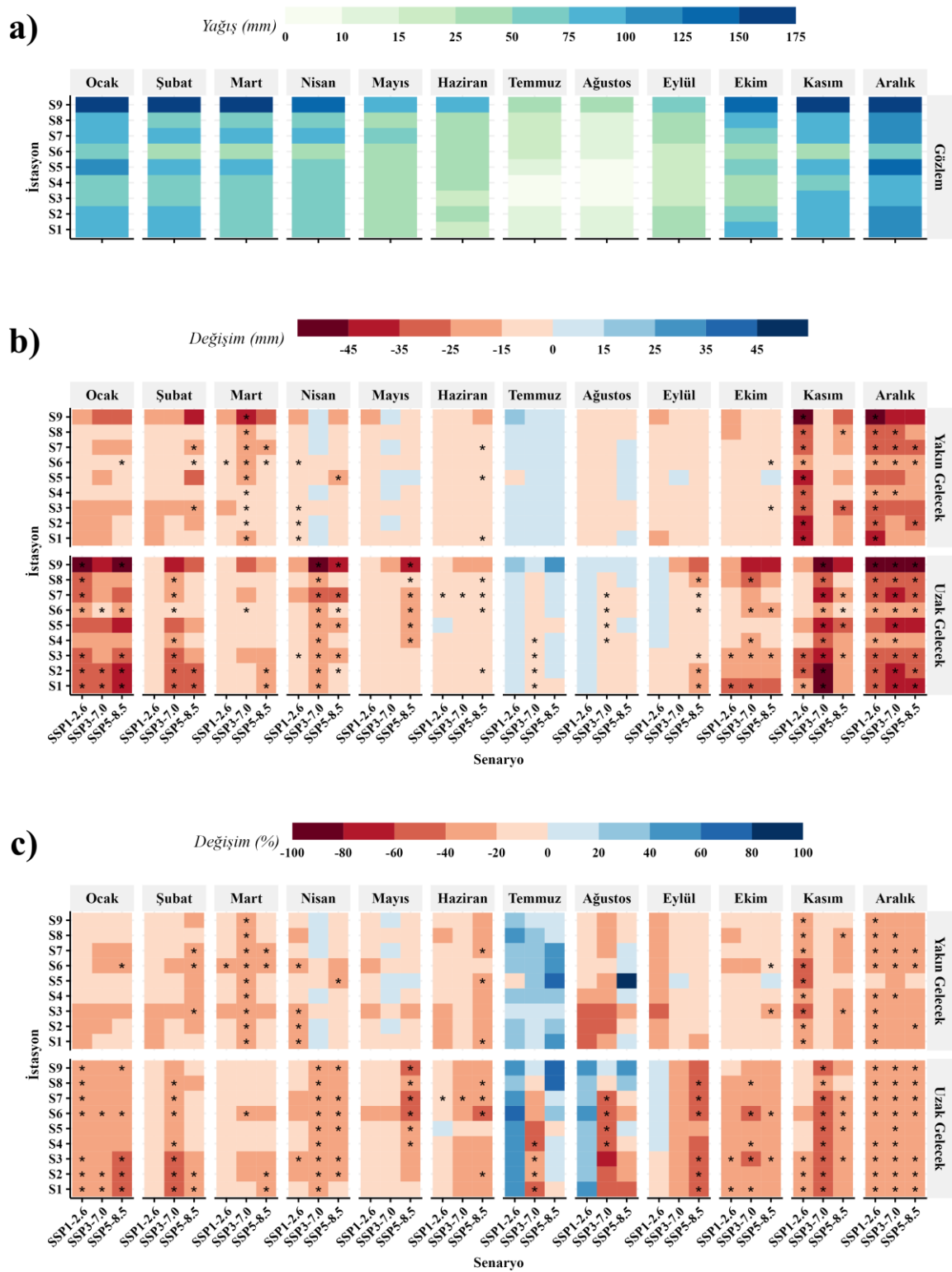
Şekil 18 ve Şekil 19 incelendiğinde toplam yağışlarda yıllık bazda ve yaz hariç diğer mevsimlerde anlamlı azalışlar vardır. Uzak ve yakın gelecekte yıllık yağışlarda en büyük azalış SSP3-7.0 ve SSP1-2.6 senaryosunda yaklaşık 250 ve 150 mm ile %30 ve %25, en küçük azalış SSP1-2.6 ve SSP3-7.0 senaryosunda 100 ve 50 mm ile %15 ve %10 öngörülmektedir. Bir bölge için genel düşünce kötümser senaryoya doğru yağışların şiddetinin azalması veya artması beklenirken burada orta senaryo olan SSP3-7.0’da en büyük azalma olabileceği görülmektedir. Benzer tarz bulgular farklı çalışmalarda da gözlemlenmiştir (Salehiev d., 2022; Li vd., 2023). Yani iyimser senaryodan kötümser senaryoya doğru her zaman artış veya azalışların şiddetinde artış olamayabileceğini söyleyebiliriz. Yine yaz mevsimi hariç uzak gelecekteki anlamlı azalışlar yakın geleceğe göre fazla olup SSP5-8.5 kötümser senaryoya doğru azalış miktarları genel olarak artmaktadır. Yakın ve uzak gelecekte yaz mevsiminde anlamsız azalış ve artışların olabileceği ve uzak gelecekte SSP3-7.0 senaryosunda genel olarak anlamlı azalışlar olabileceği tahmin edilmektedir. Yıllık yağış azalmaların sonbahar ve kış mevsimlerindeki azalmalardan kaynaklanabileceği öngörülmektedir (Şekil 18). Her ne kadar toplam yağış değerlerinde azalışlar ortaya çıksa da yakın gelecekte özellikle yaz mevsiminde uç değerlerde artışlar öngörülmektedir (Şekil 19). Aylık toplam yağış değişimleri Şekil 20’de verilmektedir.



Şekil 18. Yıllık ve mevsimsel toplam yağışların (a) gözlem dönemi ortalamaları (b) gözlem dönemine göre değişim miktarları ve (c) anlamlılıkları (*: anlamlı değişim)



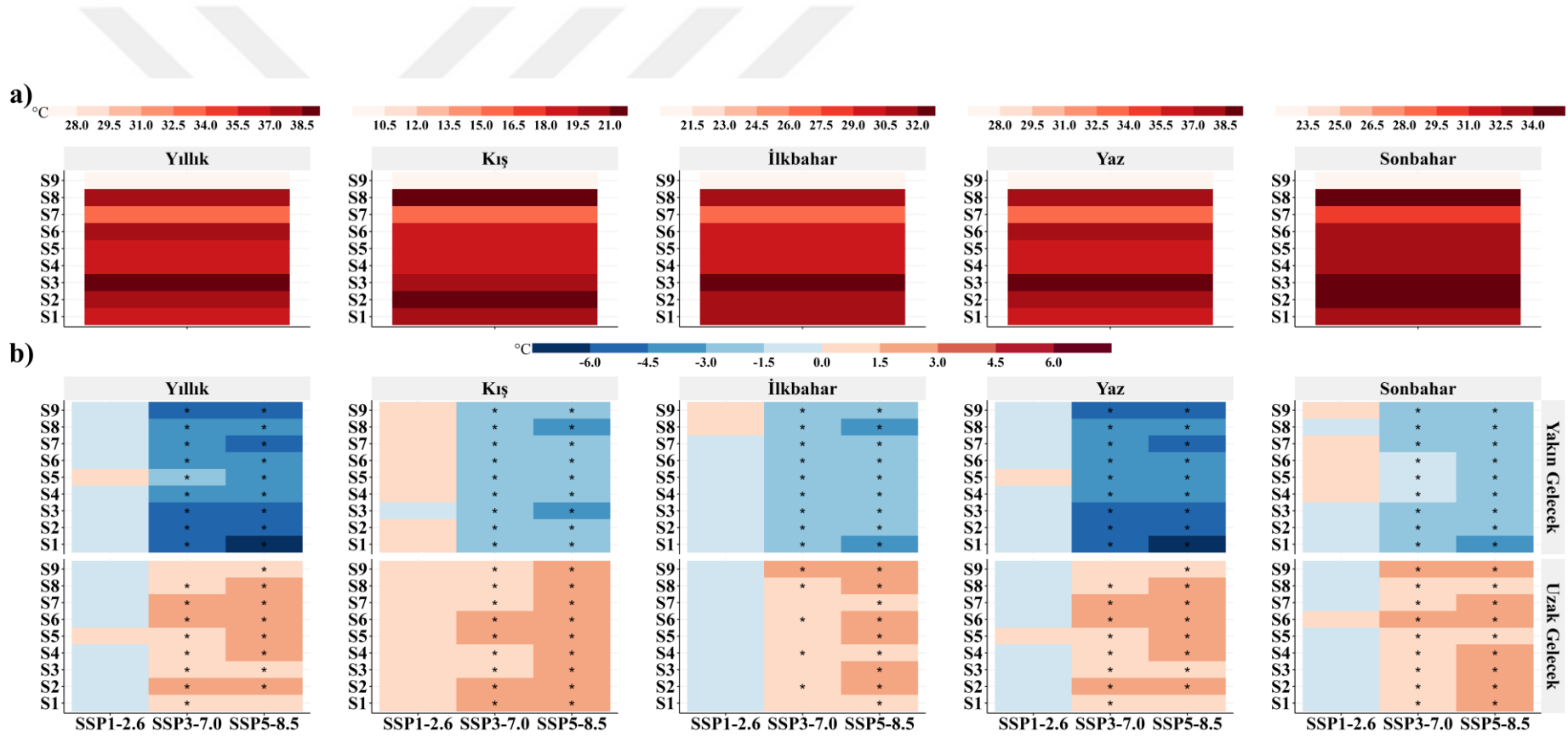
Şekil 19. Yıllık ve mevsimsel toplam yağışların gözlem ve senaryo dönemlerine ait değişimleri



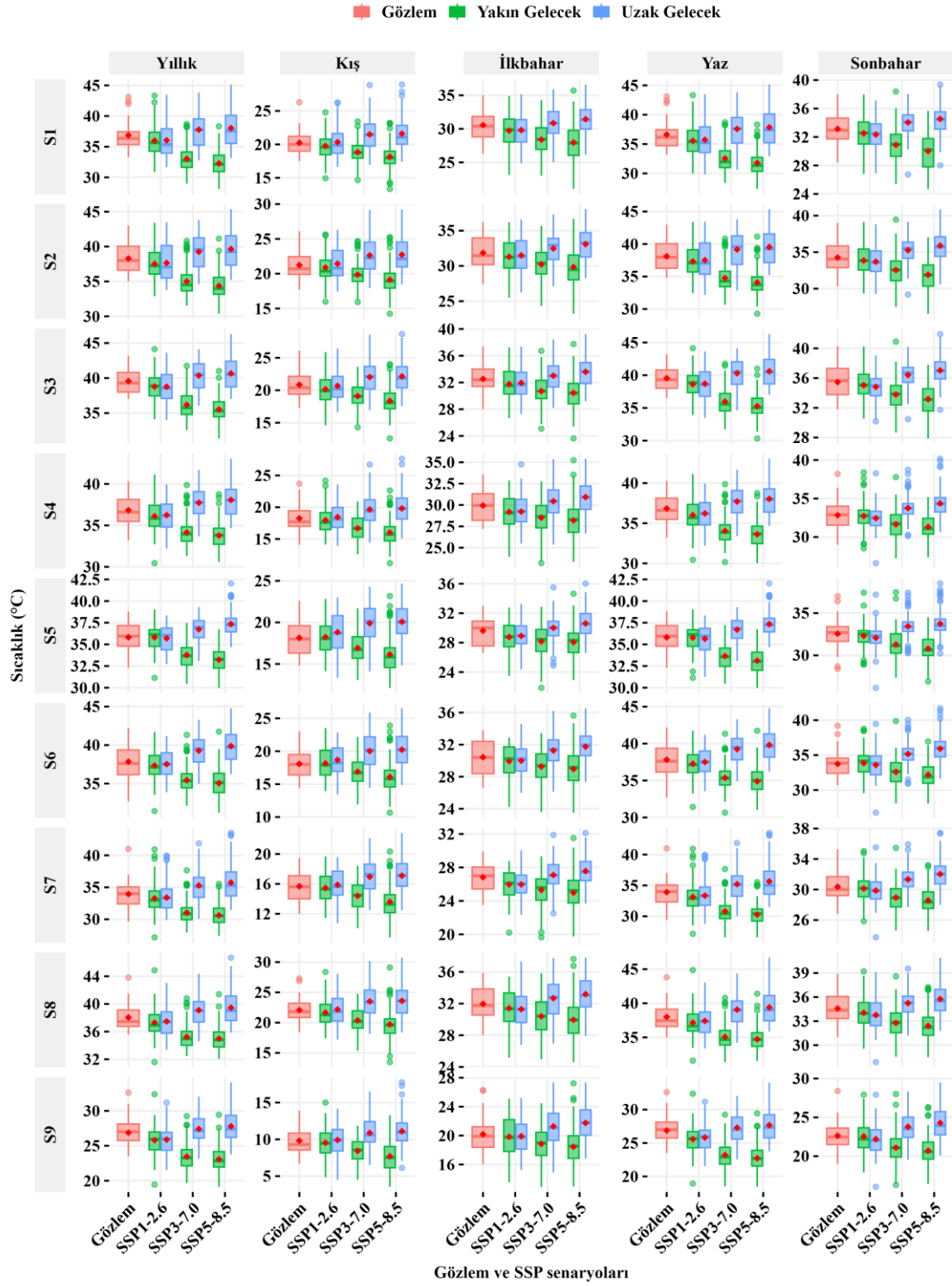
Şekil 20. Aylık toplam yağışların (a) gözlem dönemi ortalamaları, (b) gözlem dönemine göre değişim miktarları ve (c) anlamlılıkları (*: anlamlı değişim)

Şekil 20’de görüldüğü üzere istatistiki olarak anlamlı olmayan artışların olduğu temmuz ayı hariç genel olarak aylık toplam yağışlarda azalma eğilimi söz konusudur. Özellikle de mart, kasım ve aralık aylarında yakın gelecekte ve nisan, kasım ve aralık aylarında ise uzak gelecekte yağışlarda %50’lere varan anlamlı azalmalar öngörülmektedir. Uzak gelecekteki değişimler yakın geleceğe kıyasla daha şiddetli olarak ortaya çıkmıştır. Bu nedenle istatistiki olarak anlamlı değişimin miktarı uzak gelecek için daha fazladır. Sadece mart ayında farklı bir durum ortaya çıkmış ve uzak gelecekte yağışlardaki azalmanın şiddeti düşmüştür. İstatistiki olarak anlamlı yağış düşüşleri en fazla SSP3-7.0 senaryosunda tespit edilmiştir. Diğer senaryolar için farklı aylar ve istasyonlar için istatistiki olarak anlamlı değişimler tespit edilse de tespit sayıları bakımından belirgin bir fark görülmemektedir. Yıllık maksimum sıcaklıkların dönemsel ortalamaları ve değişim miktarları ise Şekil 21 ve Şekil 22’de verilmektedir.

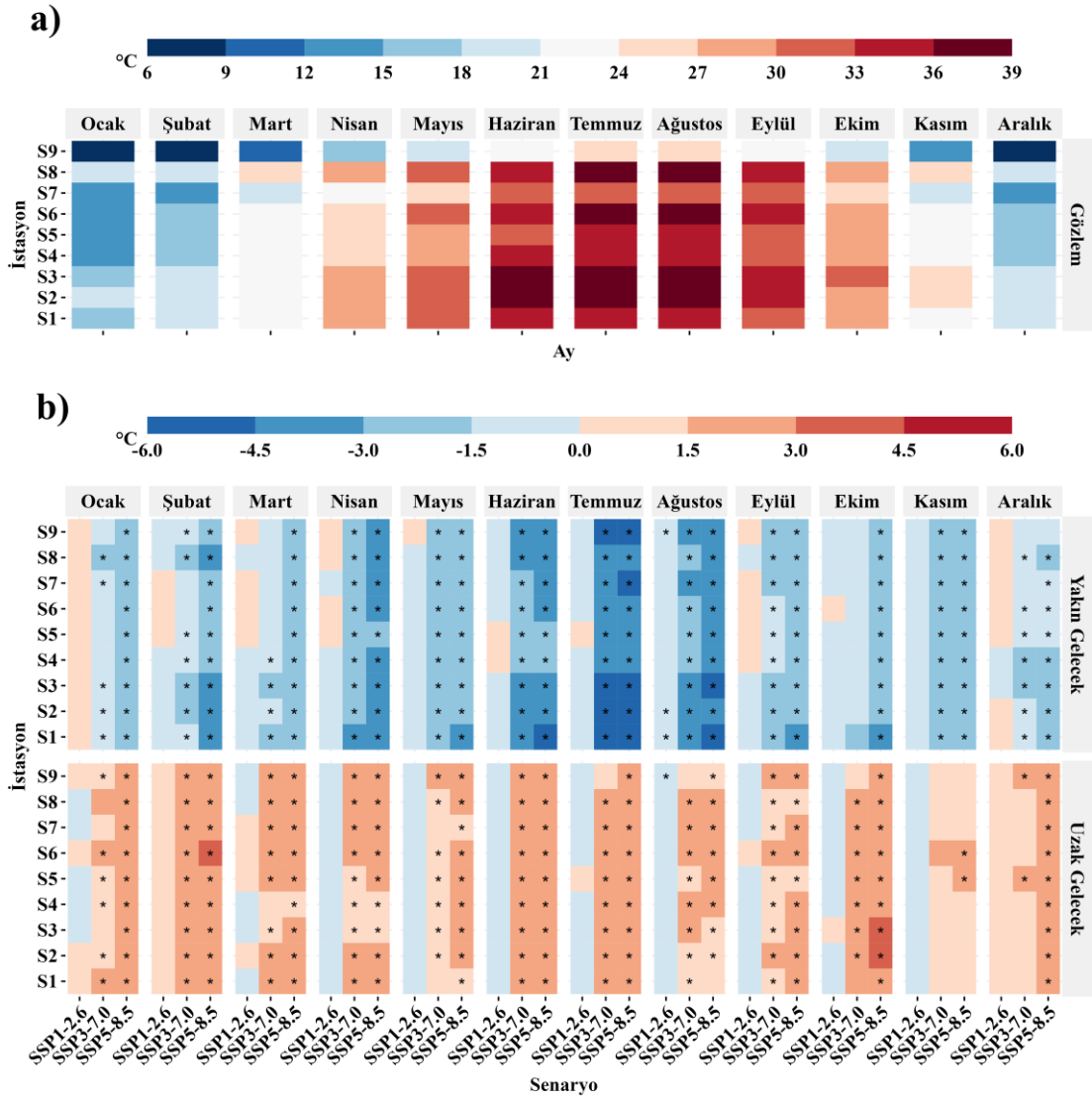
Şekil 21 ve Şekil 22’ye göre maksimum sıcaklıklar yakın gelecekte azalacak ve SSP5-8.5 senaryosuna doğru istatistiki olarak anlamlı azalışların miktarı ile azalış değerlerinin şiddeti de artacaktır. Ancak uzak gelecekte maksimum sıcaklıklardaki azalmalar, SSP1-2.6 senaryosu haricinde artışa dönmektedir. SSP5-8.5 senaryosuna gidildikçe istatistiki olarak anlamlı maksimum sıcaklık artışları ile bu sıcaklıkların artış miktarları yükselmektedir. Yakın gelecekte miktarsal olarak en büyük azalışlar SSP5-8.5 senaryosunda yaz mevsiminde ve yıllık bazda yaklaşık 4 °C azalma beklenmektedir. Uzak gelecekte en büyük artışlar SSP5-8.5 senaryosunda kış ve yaz mevsimleri ile yıllık bazda yaklaşık 2,5 °C olarak öngörülmektedir. Yıllık maksimum sıcaklıklardaki değişim temel olarak yaz mevsiminden kaynaklanmaktadır (Şekil 21). Maksimum sıcaklıkların ortalamalarında yakın gelecekte azalma olmasına rağmen ilkbahar ve sonbaharda uç değerlerde bir artış durumu söz konusudur. Uzak gelecekte ise ortalama ve uç değerlerde artışlar neredeyse tüm mevsimlerde ve dolayısıyla yıllık değerlerde beklenmektedir (Şekil 22). Aylık maksimum sıcaklıkların dönemsel ortalamaları ve değişim miktarları ise Şekil 23’te verilmektedir.



Şekil 21. Yıllık ve mevsimsel maksimum sıcaklıkların (a) gözlem dönemi ortalamaları, (b) gözlem dönemine göre değişim miktarları ve (c) anlamlılıkları



Şekil 22. Yıllık ve mevsimsel maksimum sıcaklıkların gözlem ve senaryo dönemlerine ait değişimleri

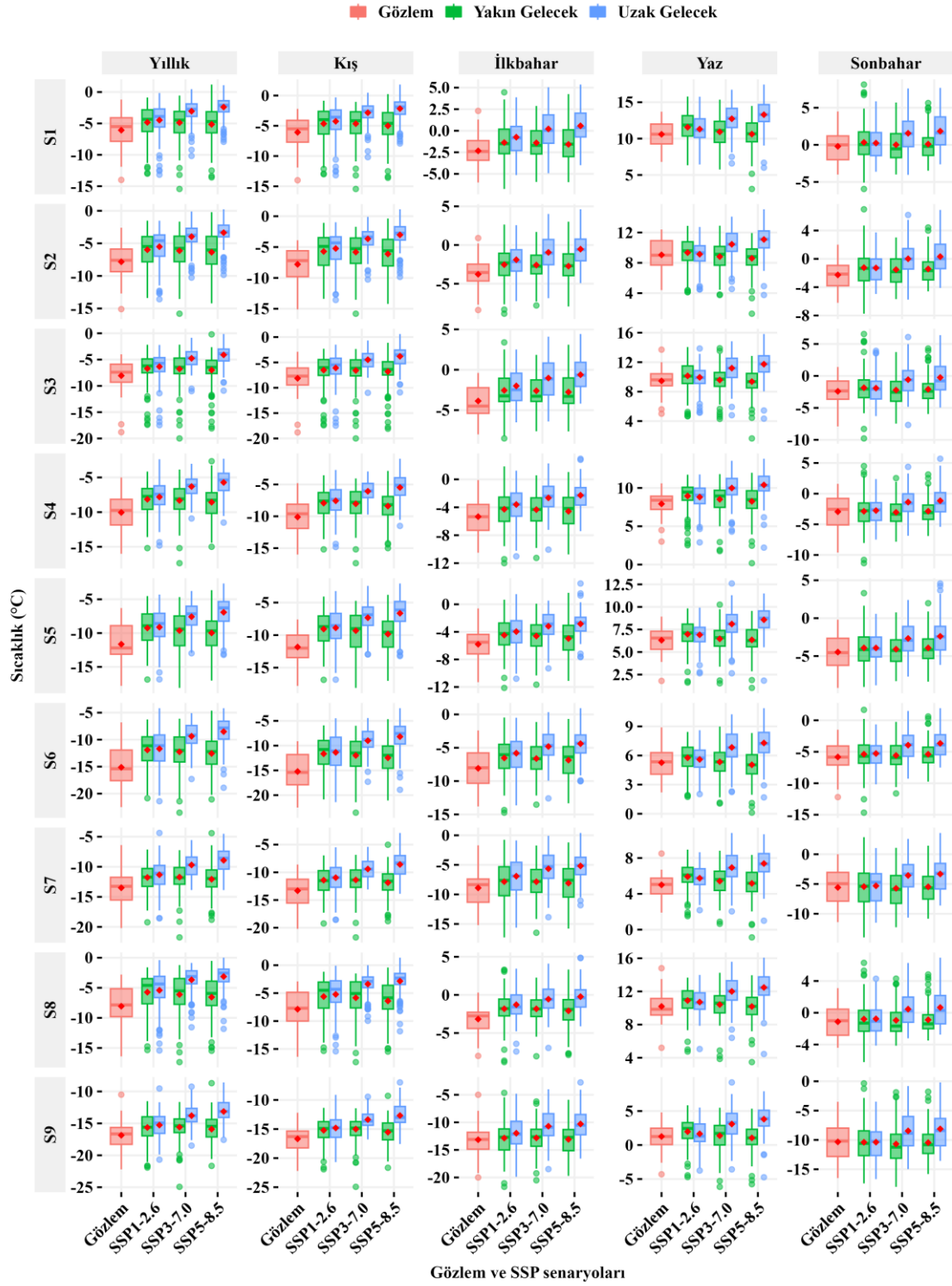


Şekil 23. Aylık maksimum sıcaklıkların (a) gözlem dönemi ortalamaları, (b) gözlem dönemine göre değişim miktarları ve (c) anlamlılıkları (*: anlamlı değişim)

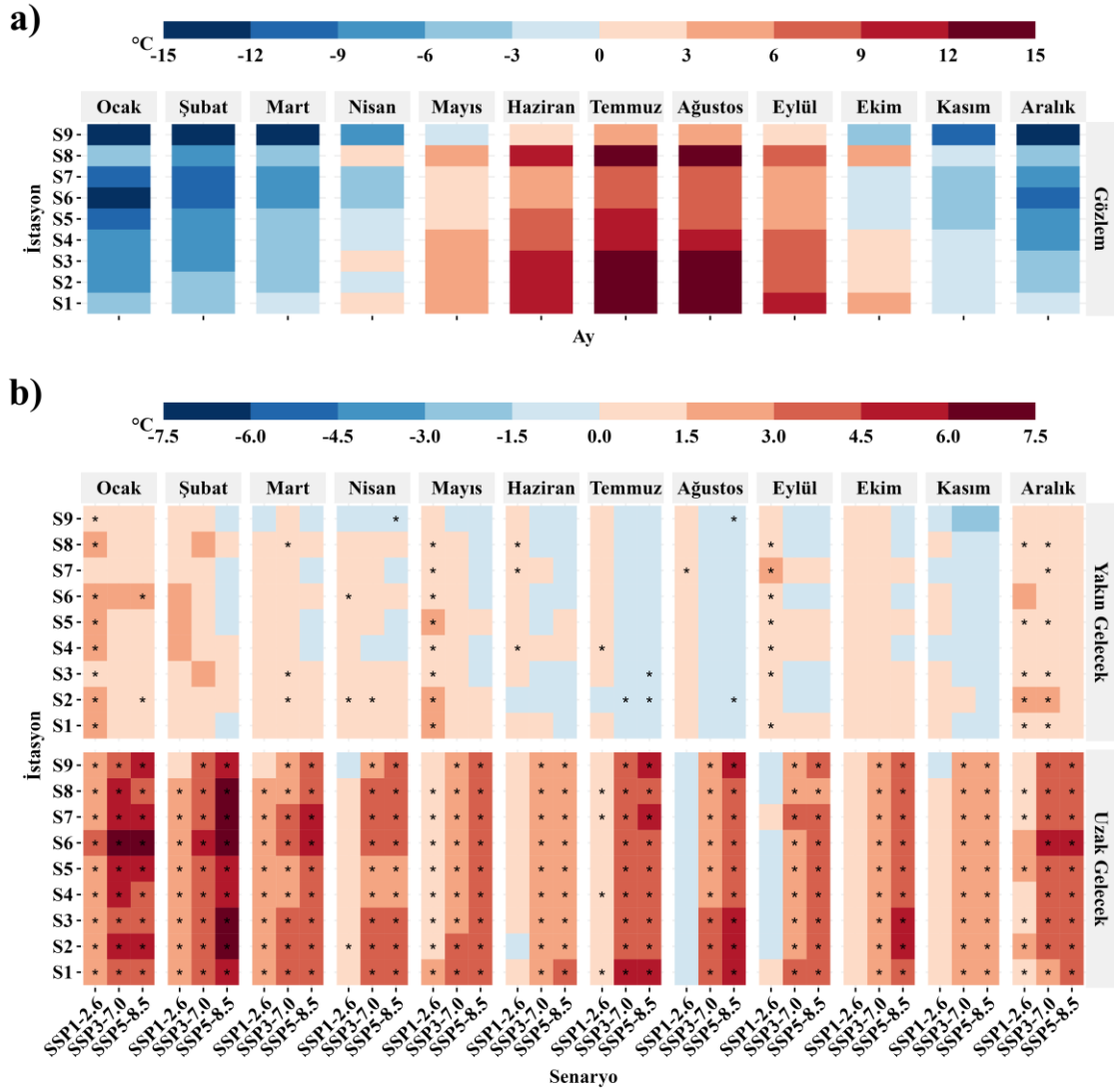
Şekil 23 incelendiğinde aylık maksimum sıcaklıklarda yakın gelecekte azalış öngörülmektedir. Bu azalma SSP5-8.5 senaryosuna doğru şiddetini arttırmaktadır. Ancak genel olarak uzak gelecekte SSP1-2.6 senaryosu hariç maksimum sıcaklıklarda artışlar olacağı belirlenmiştir. Bu artışlarda SSP5-8.5 senaryosuna doğru istatistiki olarak anlamlı hale gelmiştir. Yakın gelecekte SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 senaryolarında temmuz ve ağustos aylarında yaklaşık 4,5 °C ile en büyük azalış görülmürken, uzak gelecekte SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 senaryolarında şubat, haziran, temmuz ve ekim aylarında yaklaşık 3 °C ile en büyük artışlar öngörülmektedir. Yıllık ve yaz mevsimindeki maksimum sıcaklıkların yakın

gelecekteki azalışların ve uzak gelecekteki artışların (Şekil 21) çoğunlukla temmuz ayından kaynaklandığı görülmektedir. Yıllık ve mevsimsel minimum sıcaklıkların değişimleri Şekil 24 ve Şekil 25’te verilmektedir.

Şekil 24 ve Şekil 25 incelendiğinde, yakın gelecekte ilkbahar, kış ve yıllık minimum sıcaklıkların SSP3-7.0 senaryosunda istasyonların çoğunluğunda yaklaşık 1 °C kadar istatistiki olarak anlamlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Yaz ve sonbaharda ise yaklaşık 0,5 °C düzeyinde istatistik olarak anlamsız azalışlar öngörülmüştür. Uzak gelecekte nerdeyse tüm senaryo ve istasyonlarda istatistiki olarak anlamlı artışlar vardır. Özellikle kış mevsimi ve yıllık minimum sıcaklıklarında tüm senaryo ve istasyonlarda uzak gelecekte yaklaşık 5 °C düzeyinde istatistiki olarak anlamlı artışlar olacağı tahmin edilmektedir. Yakın gelecekte senaryolar arası belirgin bir fark yokken uzak gelecekte SSP1-2.6’dan SSP5-8.5 senaryosuna doğru minimum sıcaklıkların belirgin bir şekilde artacağı görülmektedir. Kış ve ilkbahar mevsimleri ile yıllık minimum sıcaklıkların düşük uç değerlerinin miktarlarında yakın gelecekte daha fazla artış beklenirken sonbaharda yakın ve uzak gelecekte yüksek uç değerlerde artışlar öngörülmektedir (Şekil 25). Aylık minimum sıcaklıkları değişimleri Şekil 26’da verilmektedir.



Şekil 25. Yıllık ve mevsimsel minimum sıcaklıkların gözlem ve senaryo dönemlerine ait değişimleri

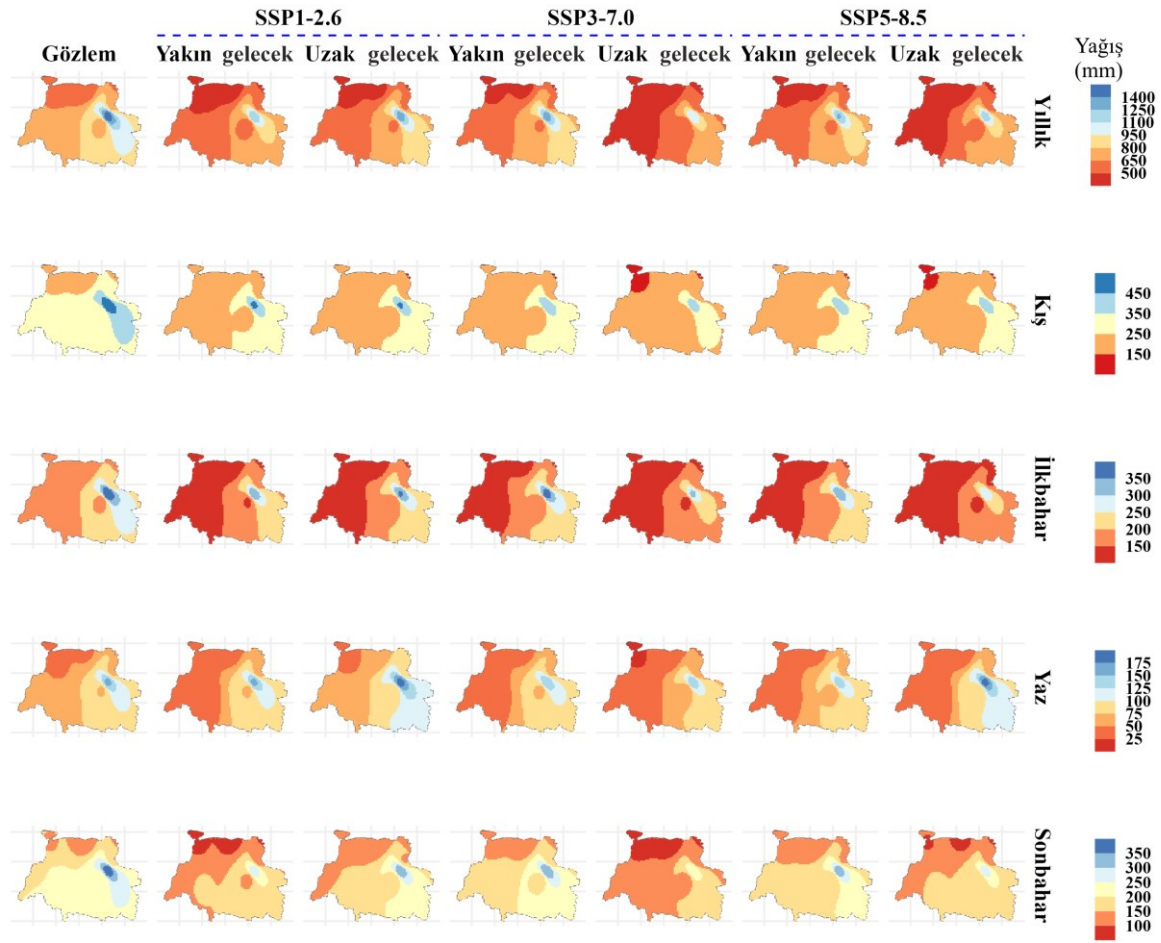


Şekil 26. Aylık minimum sıcaklıkların (a) gözlem dönemi ortalamaları, (b) gözlem dönemine göre değişim miktarları ve (c) anlamlılıkları (*: anlamlı değişim)

Şekil 26 incelendiğinde, yakın gelecekte haziran-eylül arası ve kasım aylarında aylık minimum sıcaklıklarda istatistiki olarak anlamlı olmayan yaklaşık 1 °C azalışlar öngörülmüştür. SSP1-2.6 senaryosunda ocak, mayıs, eylül ve aralık aylarında yaklaşık 1,5 °C istatistiki olarak anlamlı artışlar tespit edilmiştir. Diğer senaryo ve aylara bakıldığında genel olarak istatistiki olarak anlamlı olmayan artışlar görülmektedir. Uzak gelecekte ise SSP1-2.6 senaryosu hariç diğer senaryolarda istatistiki olarak anlamlı artışlar öngörülmektedir. En yüksek artış miktarı SSP5-8.5 senaryosunda >6 °C ile şubat ayında ortaya çıkmıştır. Bununla birlikte en yüksek artışların kış aylarında olacağı öngörülmektedir.

3.6. Susurluk Havzasının Geleceğe Yönelik Yıllık ve Mevsimsel Yağış ve Sıcaklıkların Mekansal İrdelenmesi

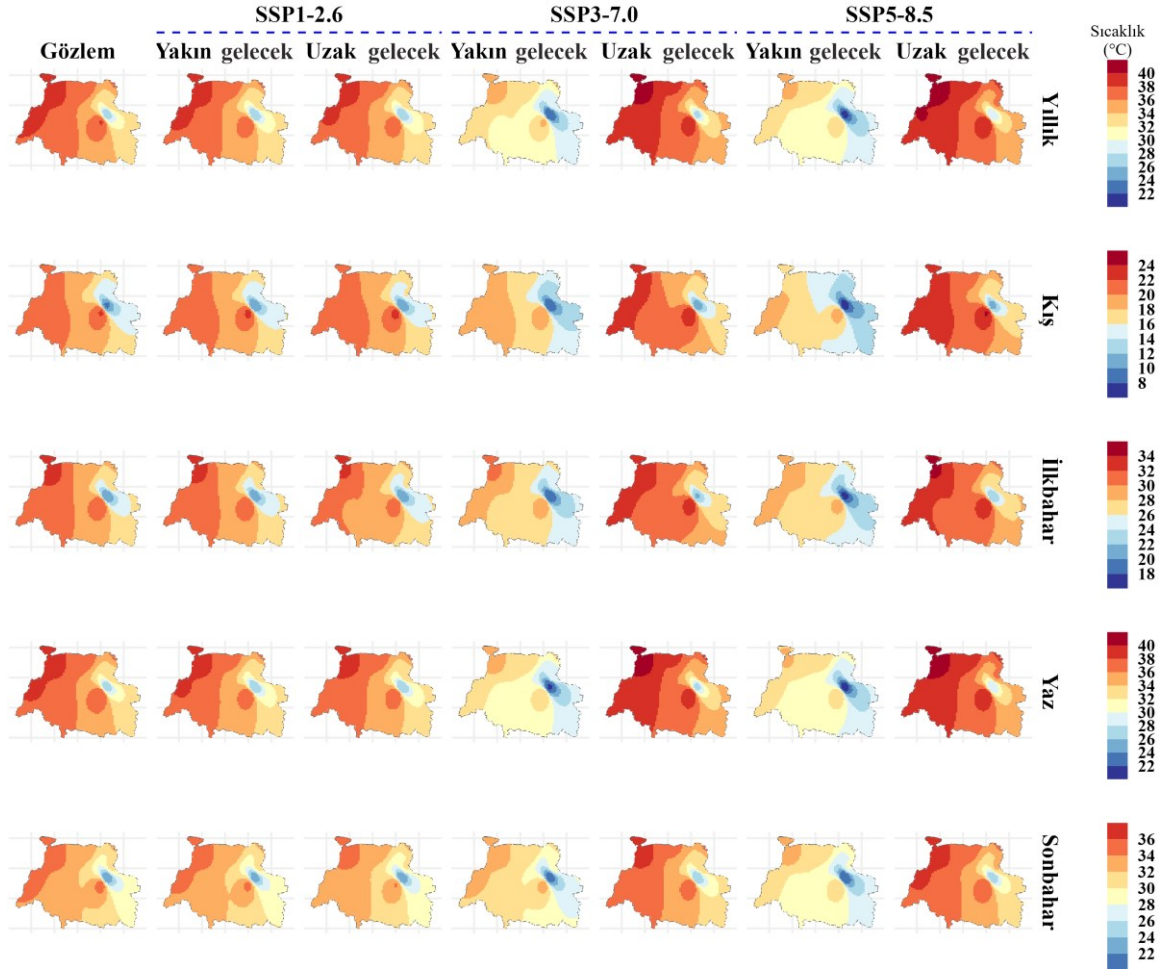
Yağış ve sıcaklıkların geleceğe yönelik zamana bağlı değişimlerin irdelenmesinden sonra toplam yağışların mekana bağlı yıllık ve mevsimsel değerlendirmesi için gözlem ve gelecek senaryolarına ait dönemsel ortalamalar hesaplanmış olup Şekil 27’de verilmektedir.



Şekil 27. Geleceğe yönelik yıllık ve mevsimsel toplam yağış ortalamalarının mekana bağlı değişimleri

Mevsimsel ve yıllık toplam yağışların dönemsel ortalamalarının (Şekil 27) değişimi incelendiğinde uzak gelecekte yakın geleceğe kıyasla yağışların daha fazla azalacağı ve bu azalışların oransal olarak batı ve kuzey batı kesimlerinde daha yüksek olacağı öngörülmektedir. SSP3-7.0 senaryosunda uzak gelecekte diğer senaryolara kıyasla daha fazla azalışların olacağı ve uzak gelecekte sonbaharda diğer mevsimlere kıyasla daha belirgin olduğu görülmektedir. Havzanın en yağışlı bölgesi olan Uludağ'ın yer aldığı kuzey doğu kesiminde yıllık yaklaşık 300 mm azalma ile SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 senaryolarına göre

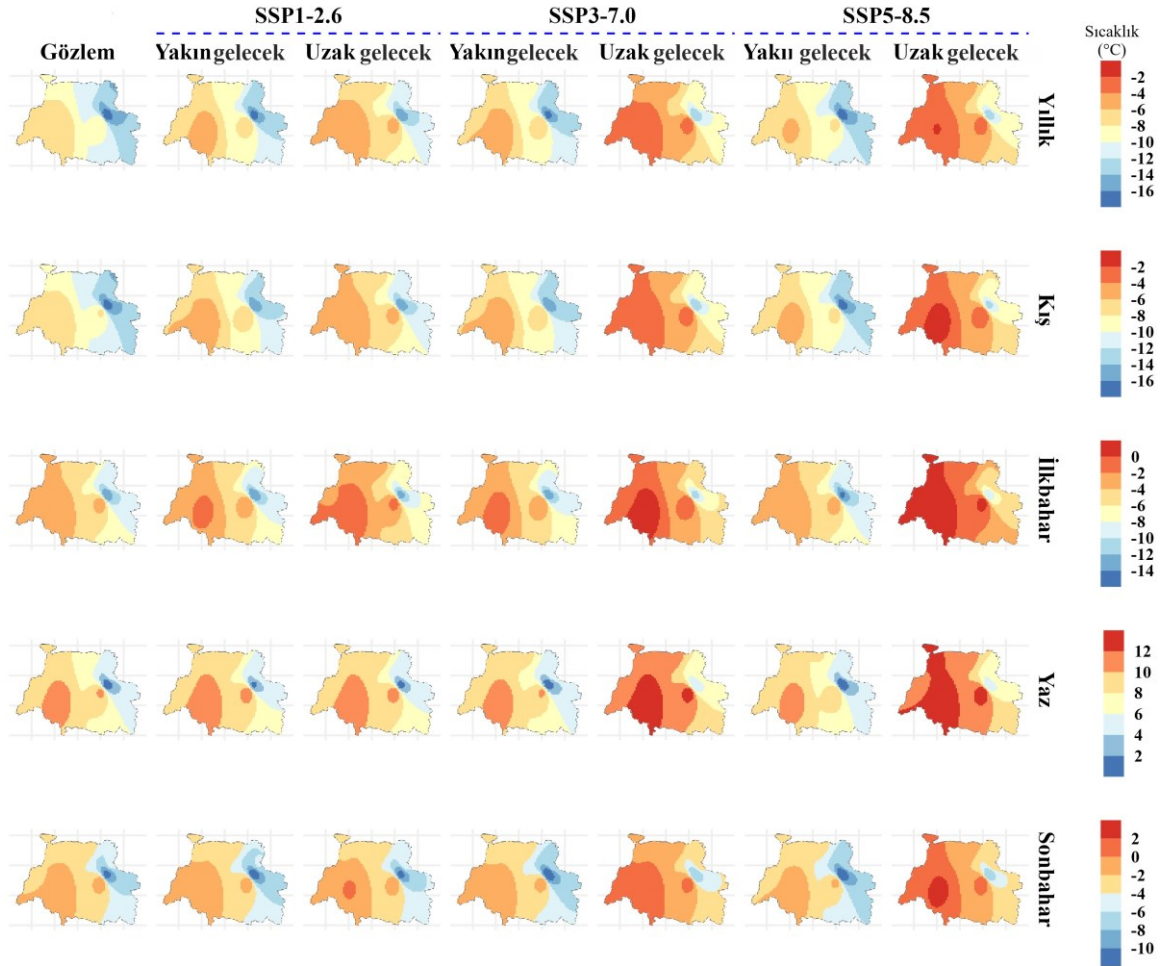
1100 mm'den yüksek yağış alan bölgelerin ciddi oranda azalabileceği öngörülmektedir. Ancak SSP1-2.6 ve SSP5-8.5 senaryolarına göre yaz mevsimindeki yağışın uzak gelecekte doğu ve güney doğu kesiminde artabileceği görülmektedir. Geleceğe yönelik maksimum sıcaklıkların mevsimsel ve yıllık dönemsel ortalama değişimleri Şekil 28'de verilmektedir.



Şekil 28. Geleceğe yönelik yıllık ve mevsimsel maksimum sıcaklık ortalamalarının mekana bağlı değişimleri

Mevsimsel ve yıllık maksimum sıcaklıklar yakın gelecekte SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 senaryolarında havzanın batı kesiminde azalmakta ve diğer bölgelere göre daha fazladır. Ancak SSP1-2.6 senaryosunda gözlem verilerine göre belirgin bir değişiklik yoktur (Şekil 28). Uzak gelecekte ise SSP1-2.6 haricindeki senaryolarda gözlem verilerine göre yaklaşık 2 °C artış vardır. Havzanın kuzeybatısında uzak gelecekte yıllık ve yaz mevsimindeki maksimum sıcaklıkların ortalaması SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 senaryolarında gözleme göre yaklaşık 2 °C artarak 40 °C'yi aşabileceği, yakın gelecekte SSP5-8.5 senaryosunda ise

havzanın kuzey doğusunda yaklaşık 4 °C azalarak 22 °C'den daha aşağı düşebileceği öngörülmektedir. Havzanın minimum sıcaklıklarının mevsimsel ve yıllık dönemsel ortalaması Şekil 29'da verilmektedir.



Şekil 29. Geleceğe yönelik yıllık ve mevsimsel minimum sıcaklık ortalamalarının mekana bağlı değişimleri

Havzanın mevsimsel ve yıllık minimum sıcaklıklarının geleceğe yönelik değişimleri incelendiğinde yakın gelecekte yaz ve sonbahar hariç batı kesiminde artışlar varken uzak gelecekte yakın geleceğe göre daha fazla artış vardır (Şekil 29). Uzak gelecekte SSP5-8.5 senaryosunda yıllık ve kış mevsiminde yaklaşık 6 °C artış beklenmektedir. Ayrıca yaz mevsiminde yakın gelecekte önemli değişim olmayıp uzak gelecekte özellikle de SSP5-8.5 senaryosunda Uludağ çevresinde yaklaşık 3,5°C'lik artış öngörülmektedir. Yakın gelecekte senaryolar arası fark görülmeyip uzak gelecekte SSP5-8.5 senaryosuna doğru minimum sıcaklıklar artışı mavi renklerin azalarak kırmızı renkli alanların artışlarıyla görülmektedir.

3.7. SWAT Hidrolojik Modelin Kurulumu

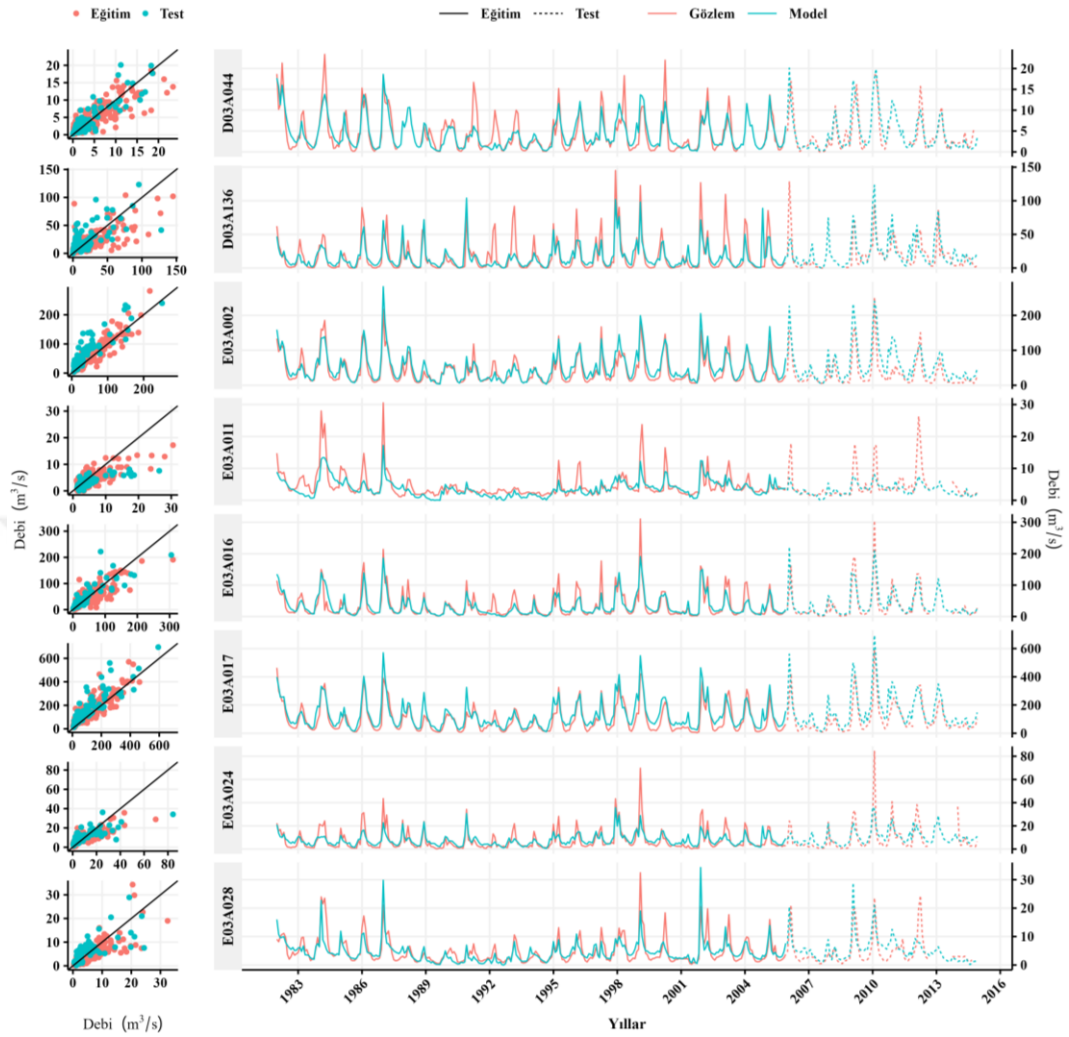
Geleceğe yönelik günlük toplam yağış, maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklık verileri elde edildikten havzadaki su güvenliği parametrelerini incelemek için öncelikle SWAT hidrolojik modeli kurulumu 1982-2005 aralığında yapılmış olup 2006-2014 döneminde test edilmiştir. Performans değerlendirmeleri aylık ortalama akımlar üzerinde R^2 , NSE ve PBIAS kriterleri kullanarak yapılmıştır. Model kalibrasyonu için 13 adet parametre kullanılmış ve bu parametrelere ait en uygun değerler belirlenmiştir (Tablo 14). Model kalibrasyon sonuçları Tablo 15'te ve Şekil 30'da verilmektedir.

Tablo 14. SWAT model kurulumu için kullanılan parametreler ve en uygun değerleri

Parametre	Parametre tanımı	Başlangıç değer aralıkları	En uygun değer
r_CN2.mgt	SCS akış eğrisi numarası	(-0,3) - 0,3	-0,272
v_ALPHA_BF.gw	Taban akımı alfa faktörü (1/gün)	0 - 1	0,091
v_GW_DELAY.gw	Yeraltı suyunun gecikme süresi (gün)	0 - 500	308,015
v_GWQMN.gw	Geri akış oluşması için sığ akiferdeki su eşik derinliği (gün)	0 - 5000	2.031,109
v_REVAPMN.gw	Sığ akiferdeki eşik derinliği (mm)	0 - 1000	3,582
r_RCHRG_DP.gw	Derin akifer sızma oranı	0 - 1	0,344
v_GW_REVAP.gw	Yeraltı suyu katsayısı	0,02 - 0,2	0,167
v_ESCO.hru	Topraktan buharlaşma dengeleme faktörü	0 - 1	0,866
v_EPCO.hru	Bitkiler için dengeleme faktörü	0 - 1	0,513
r_SOL_K.sol	Toprağın doygun hidrolik iletkenliği (mm/saat)	(-5) - 5	0,161
r_SOL_BD.sol	Toprağın hacimsel yoğunluğu (g/cm ³)	(-0,5) - 0,5	0,296
r_SOL_AWC.sol	Toprağın mevcut su kapasitesi (mm/mm)	(-0,5) - 0,5	0,400
r_SOL_Z.sol	Toprak yüzeyinden tabakanın altına kadar olan derinlik (mm)	(-0,5) - 0,5	0,337

Tablo 15. SWAT model kalibrasyonu performans sonuçlarıbulguları

İstasyon	Eğitim (1982-2005)			Test (2006-2014)		
	R^2	NSE	PBIAS	R^2	NSE	PBIAS
D03A044	0,59	0,71	-2,80	0,73	0,74	2,90
D03A136	0,43	0,62	-5,30	0,39	0,30	21,40
E03A002	0,78	0,79	20,30	0,60	0,36	70,90
E03A011	0,39	0,52	-18,60	0,27	0,34	-28,50
E03A016	0,60	0,74	-3,30	0,66	0,74	12,90
E03A017	0,72	0,69	28,00	0,62	0,45	49,80
E03A024	0,49	0,63	3,70	0,39	0,53	12,40
E03A028	0,47	0,58	-6,20	0,45	0,46	19,10



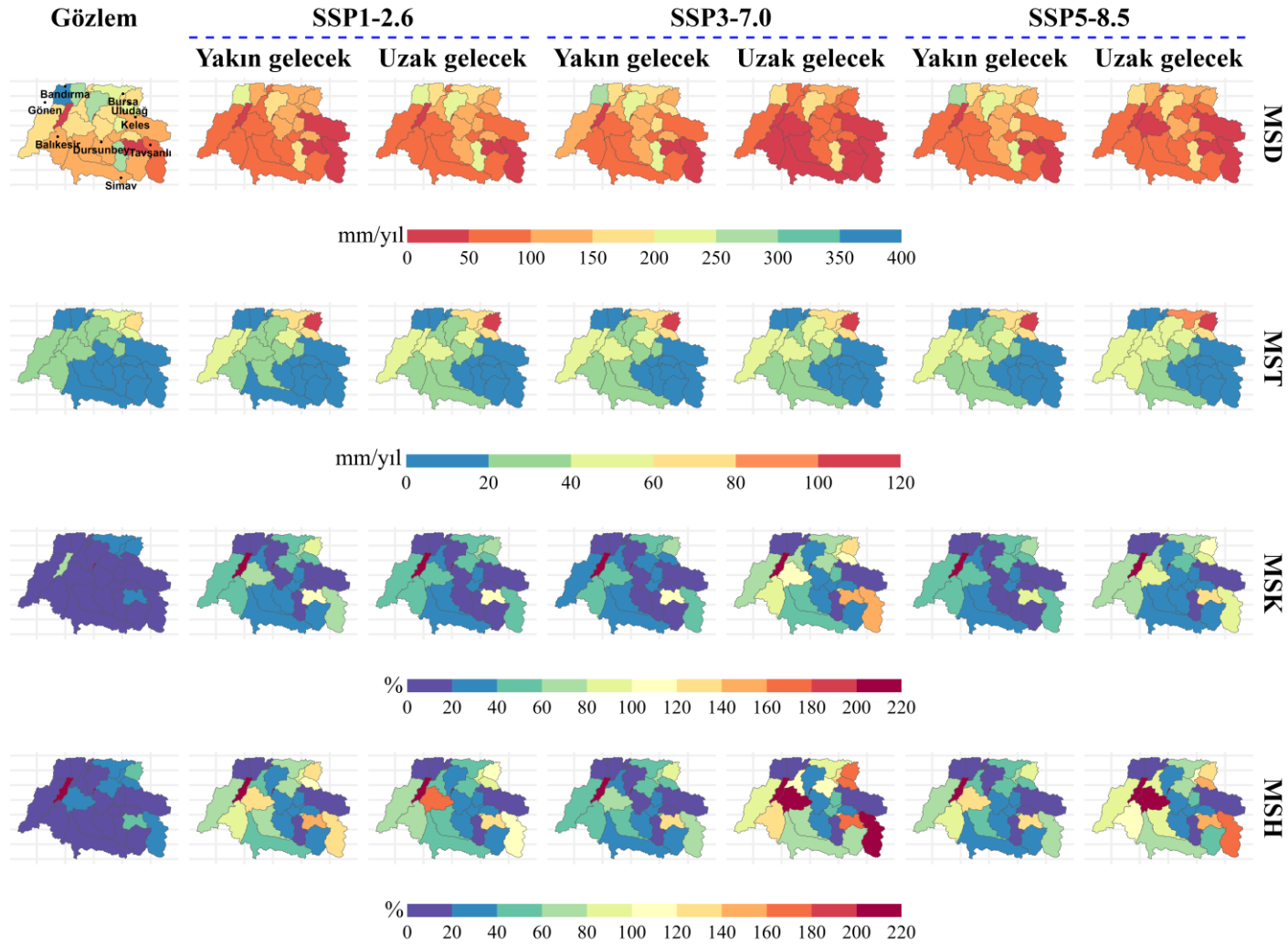
Şekil 30. SWAT çıktılarının saçılım ve zaman serisi grafikleri

Tablo 15 ve Şekil 30 incelendiğinde model çıktılarının ölçüme ait zaman serisi ile uyumlu olduğu, saçılımların genel olarak 1:1 doğrusu etrafında toplandığı, model performans değerleri R^2 , NSE ve PBIAS eğitim ve test dönemlerin bütüncül ortalamaları sırasıyla 0,54, 0,58 ve 20 değerlerini alarak Moriasi vd. (2007; 2015) tarafından yapılan çalışmalarda verilen yeterli kabul edilen değerleri (R^2 için $\geq 0,5$, NSE için $\geq 0,5$ ve PBIAS için $\leq \pm 25$) genel olarak yakaladığı görülmektedir. Model genel olarak zaman serisindeki yüksek değerleri yakalama eğiliminde olmasına karşın normal değerlere göre uç değerleri yakalamada yetersiz olduğu görülmektedir. Genellikle bu şekilde çıkması beklenen bir durumdur (Tan vd., 2020). Genel olarak bakıldığında SWAT model kalibrasyonun kabul edilebilir düzeyde olduğu için kurulan model senaryo verileri ile ileriye dönük akım tahmininde kullanılmıştır.

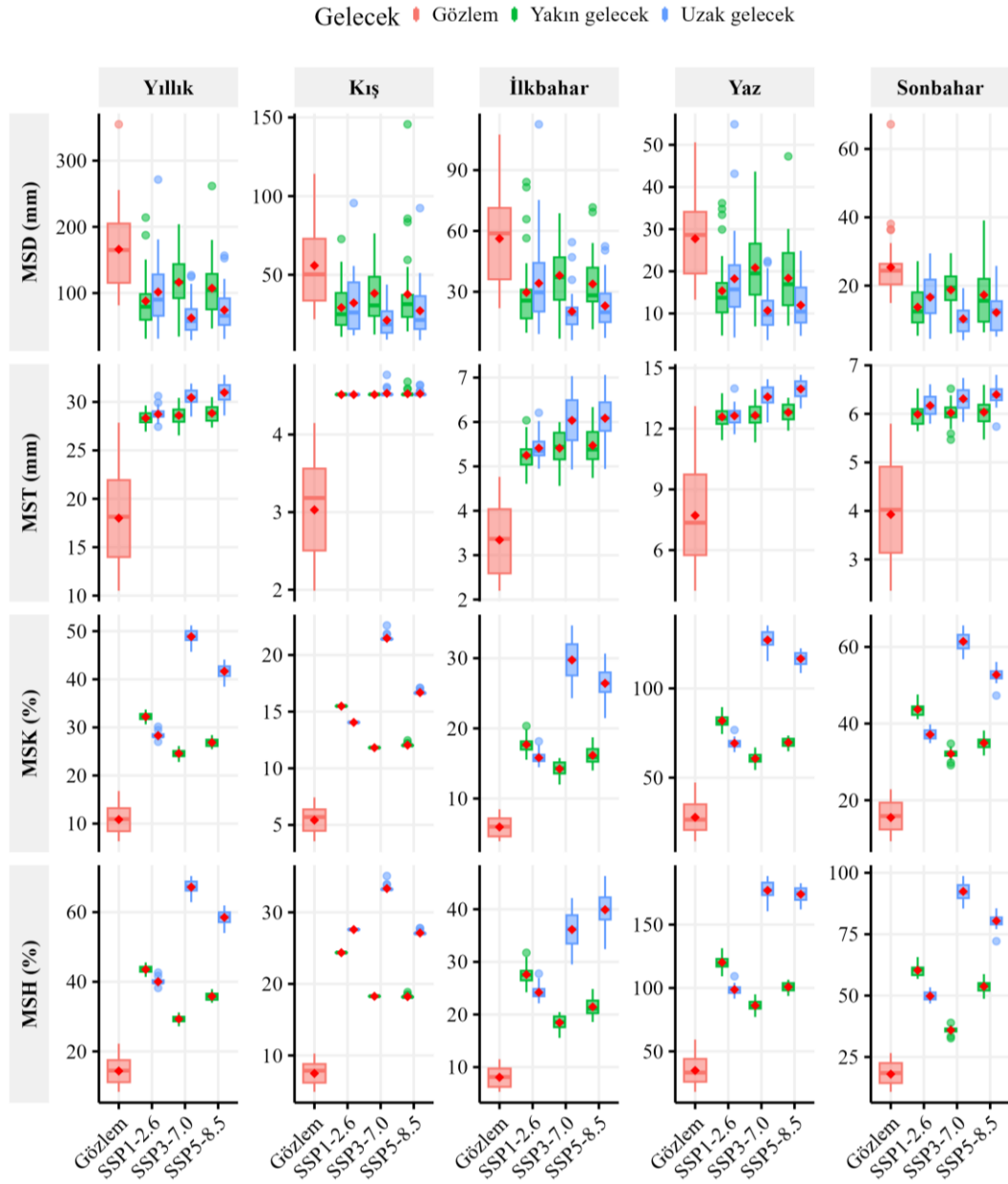
3.8. Su Güvenliği Parametrelerinin Geleceğe Yönelik Değişimleri

Su güvenliği değerlendirmesi için MST verileri ISIMIP projesinde bulunan GDM'lerinin (GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0 ve UKESM1-0-LL) iklim verileri kullanılarak oluşturulan su tüketim senaryo verileri kullanılmıştır. GDM'lerin barındırdığı olası belirsizlikleri azaltmak için literatürde ÇMTO dikkate alınmaktadır (Ahmed vd., 2019; Bağcı vd., 2021). Bu nedenle GDM'lere ait su tüketim verilerinin ortalamaları alınmıştır. Ardından alt havzalara yakın sayısal ağların etkisini dikkate almak için iki yönlü interpolasyon yöntem ile $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ olarak yeniden boyutlandırılmıştır. Her alt havzaya düşen sayısal ağların ortalaması alınarak MST verileri, MSK ve MSH hesabı için kullanılmıştır. Mavi ve yeşil su bileşenlerinin alansal ortalamalarının yıllık ve mevsimlik değişimi su güvenliği parametreleri olan mavi su için MSD, MST, MSK ve MSH gözlem ve gelecek dönem yıllık ortalamaları Şekil 31'de ve alansal ortalamalarının yıllık ve mevsimlik değişimleri Şekil 32'de verilmektedir.

Şekil 31 ve Şekil 32'ye kıyasla gözlem döneminde MSD yıllık ortalama yaklaşık 180 mm iken havzanın kuzey batı kısmına kıyasla diğer bölgelerde daha azdır. MSD en büyük değerini yaklaşık 60 mm ile ilkbaharda alırken en küçük değerini yaklaşık 25 mm ile sonbaharda almaktadır. Yakın gelecekte SSP1-2.6 senaryosundaki yıllık ve mevsimsel MSD'nin azalışı diğer senaryolara kıyasla daha yüksek ve yaklaşık %60'tan fazladır. Yıllık ve mevsimsel azalma SSP3-7.0 senaryosunda daha az olsa da SSP8-8.5 senaryosu ile arasında önemli bir fark olmaksızın ortalama %30'lara dayanmaktadır. Uzak gelecekte SSP3-7.0 senaryosunda Balıkesir ve Tavşanlı çevrelerinde MSD yıllık 50 mm/yıl'ın altına inmesi ve gözleme göre en büyük azalma SSP3-7.0 senaryosunda beklenmekte olup yıllık ve mevsimlerde ortalama azalmanın yaklaşık %70 olacağı tahmin edilmektedir.



Şekil 31. Mavi su depolaması (MSD), tüketimi (MST), kıtlığı (MSK) ve hassasiyetinin (MSH) gözlem ve gelecek dönem değişimleri



Şekil 32. Mavi su bileşenlerinin alansal ortalamalarının yıllık ve mevsimsel değişimleri

Gözlem dönemi boyunca MST değeri havzada yıllık ortalama 18 mm olup mevsimsel olarak en yüksek ortalama değerine yaz döneminde 8 mm ile ulaşmaktadır. Yakın gelecekte MST değerlerinin gözlem döneminden yüksek olacağı ve kış hariç diğer mevsimlerde ve yıllık bazda kötümser senaryoya doğru artacağı öngörülmektedir. Uzak gelecekte ise yakın gelecekte daha yüksek olabileceği ve SSP1-2.6'dan SSP5-8.5 senaryosuna doğru giderek artabileceği beklenmektedir (Şekil 32). Gözlem döneminde değişkenliğin yüksek, yakın ve uzak gelecekte düşük olduğu görülmektedir. Gözlem ile gelecek verileri arasında ortalama olarak çok büyük fark olduğu yani bir yanlışlıktan da bahsetmek gerekebilir. Ancak başka

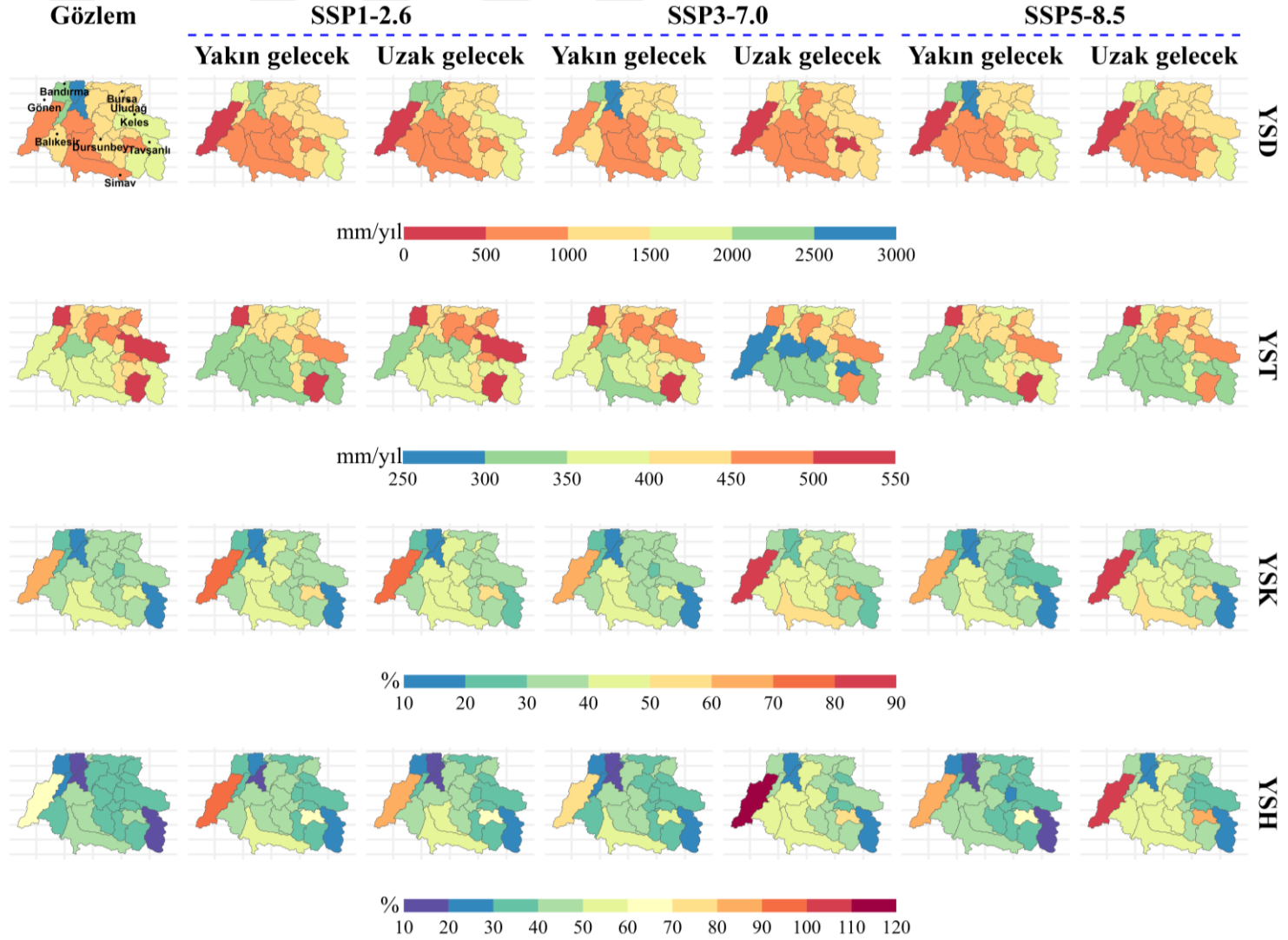
kaynak olmadığından MST verileri ISIMIP'den doğrudan kullanıldığı için tam bir uyumluluktan bahsedemeyiz. Havzanın kuzeydoğu kesiminde yer alan Bursa çevresinde MST değeri yaklaşık 50 mm iken SSP5-8.5 senaryosunda yakın gelecekte 60 mm ve uzak gelecekte 80 mm olabileceği öngörülmektedir. Yakın ve uzak gelecekte Tavşanlı ve Bandırma çevrelerinde önemli bir değişiklik beklenmemektedir (Şekil 31).

MSD ve MST'ye bağlı olarak MSK değerleri havzanın büyük çoğunluğunda %20'den az ve havzanın kuzey doğu kısmındaki Bursa çevresinde %30 ile havzaya göre daha yüksek değerler almıştır (Şekil 31). Yıllık ve mevsimsel MSK değerleri gözlem döneminde yaklaşık %10 iken yakın gelecekte yıllık %28, en yüksek olarak yaz mevsiminde %60 olabileceği ve gözlem dönemine kıyasla en fazla artış SSP1-2.6 senaryosunda olacağı tahmin edilmektedir. Uzak gelecekte ise MSK değeri yıllık %40, yaz mevsiminde %100 olabileceği ve en fazla artış SSP3-7.0 senaryosunda olacağı öngörülmektedir (Şekil 32). Uzak gelecekte en büyük artışın SSP3-7.0 senaryosunda Tavşanlı çevresinde olacağı, Bursa çevresinde MSK değerinin yaklaşık %90 ve Balıkesir çevresinde %80 olacağı tahmin edilmektedir (Şekil 31).

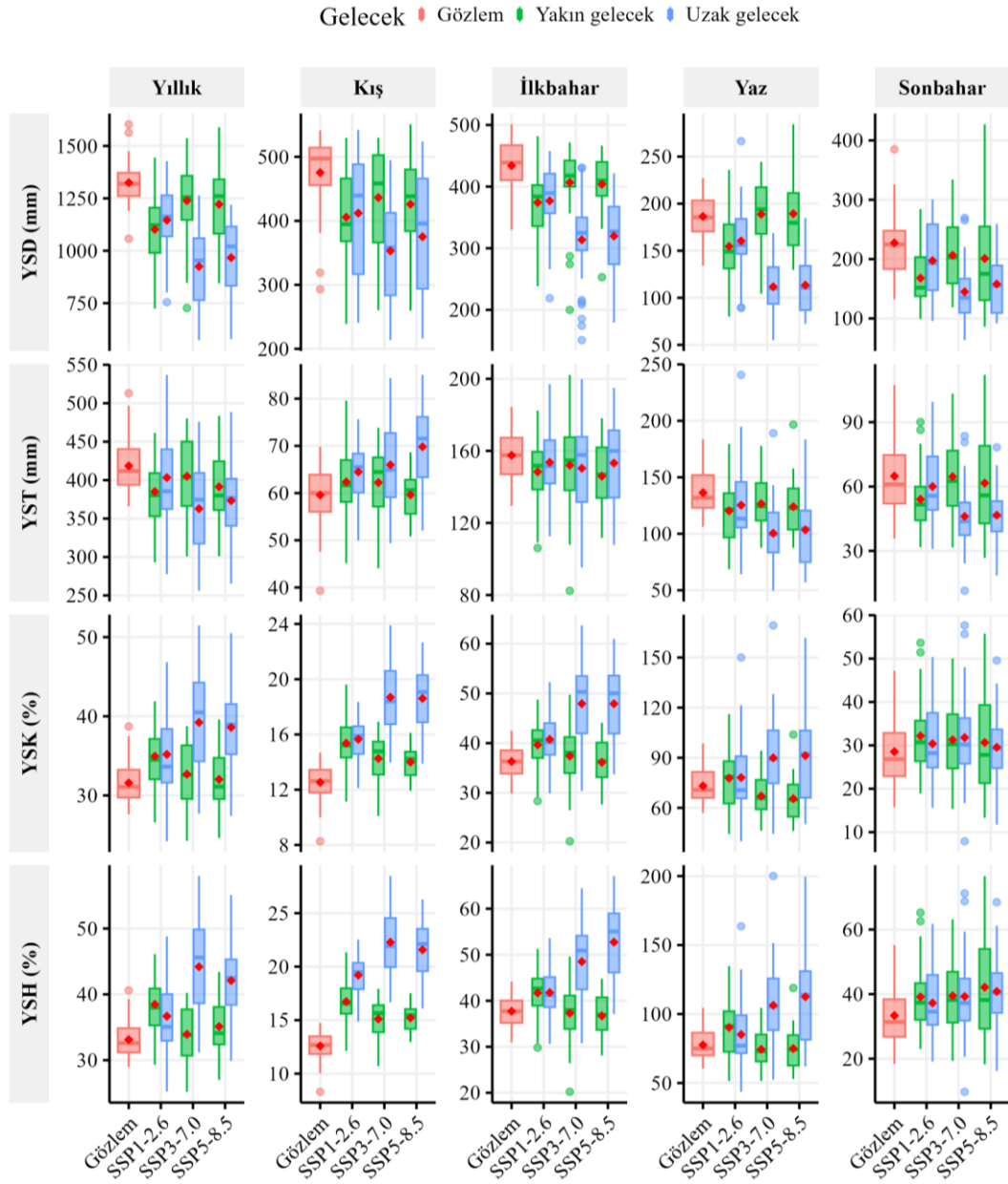
MSH ise MSK ile benzer örüntüye sahip olup ortalama %18 civarındadır. Yakın gelecekte %35 olacağı ve gözlem dönemine kıyasla SSP1-2.6 daha fazla artış ile %40 olacağı öngörülmektedir. Uzak gelecekte ise SSP3-7.0 ve SSP8-8.5 senaryolarında yıllık yaklaşık %60 ve yazın %120 olabileceği hesaplanmıştır (Şekil 32). Uzak gelecekte en büyük artışın SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 senaryolarında Tavşanlı çevresinde olacağı, Bursa çevresinde MST değerinin yaklaşık %110 ve Balıkesir çevresinde %130 olacağı tahmin edilmektedir (Şekil 31).

Mavi su değerlendirmesinden sonra su güvenliğinin diğer parametresi olan yeşil su için YSD, YST, YSK ve YSH gözlem ve gelecek dönem yıllık ortalamaları Şekil 33'te ve alansal ortalamalarının yıllık ve mevsimsel değişimleri Şekil 34'te verilmektedir.

Şekil 33 ve Şekil 34'te görüldüğü üzere havzanın kuzeybatı kesiminde yer alan Bandırma çevresinde yaklaşık 2.500 mm ile en yüksek YSD'ye sahipken diğer bölgelerde ve güney batı kesiminde oldukça düşüktür. Havzada yazın YSD ortalama 180 mm ve yıllık 1.300 mm'dir. Yakın gelecekte önemli bir değişiklik beklenmezken SSP1-2.6 senaryosunda yıllık ve mevsimsel %10 azalma beklenmektedir. Uzak gelecekte ise SSP1-2.6 senaryosunda azalma oldukça azken SSP3-7.0 senaryosunda yıllık ve mevsimsel ortalama %40'a varan en büyük azalma söz konusudur (Şekil 34). Balıkesir ve Gönen arasında kalan alt havzada genel olarak YSD değerlerinin 500 mm'nin altına inmesi ve Bandırma çevresinde uzak gelecekte SSP1-2.6 hariç genel olarak azalması beklenmektedir.



Şekil 33. Yeşil su depolaması (YSD), tüketimi (YST), kıtlığı (YSK) ve hassasiyetinin (YSH) gözlem ve gelecek dönem değişimleri



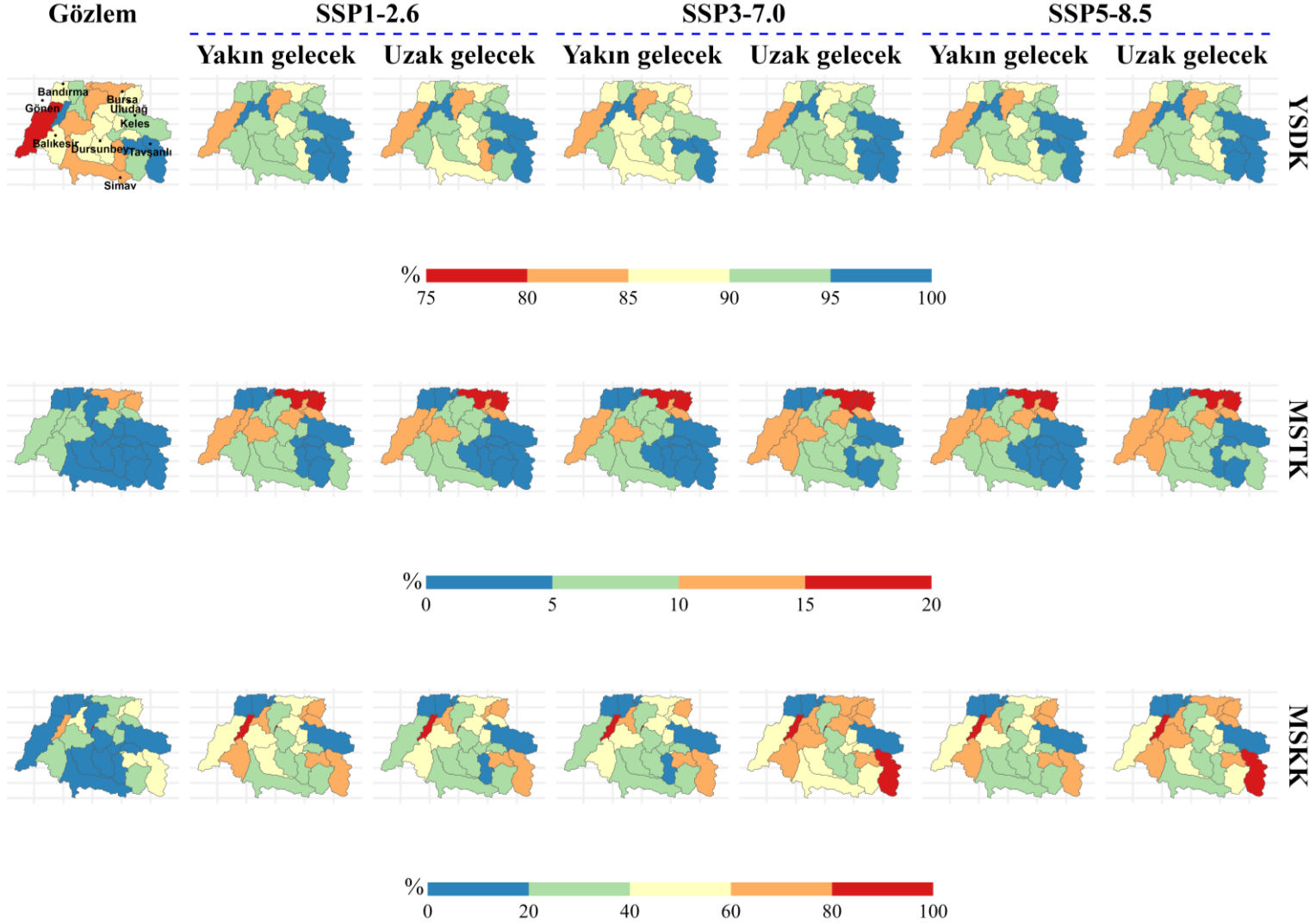
Şekil 34. Yeşil su bileşenlerinin alansal ortalamalarının yıllık ve mevsimsel değişimleri

Gözlem döneminde havzadaki YST'nin yıllık ortalaması 420 mm, ilkbaharda 160 mm ile en yüksek ve kışın 60 mm ile en düşük değerini almaktadır. Yakın gelecekte yıllık ve mevsimsel değerlerde önemli bir değişiklik beklenmemekte iken uzak gelecekte SSP1-2.6 senaryosu hariç MST'nin yıllık, yaz ve sonbahardaki ortalama değerlerinde azalma kış değerlerinde artma tahmin edilmektedir (Şekil 34). Havzanın kuzey ve kuzeydoğu kesimlerinde ortalama YST 470 mm ile diğer bölgelere göre daha yüksektir. Yakın gelecekte SSP3-7.0 senaryosunda güneybatı kesimdeki Balıkesir ile Simav arasında ve Uludağ çevresinde azalma beklenmektedir. Uzak gelecekte ise SSP3-7.0 senaryosunda havzanın

orta ve batı kesimlerinde en büyük azalma ve 300 mm'nin altına düşmesi beklenmektedir (Şekil 33).

YSD ve YST'ye bağlı olarak YSK değerleri gözlem döneminde yıllık ortalama %30 ve olup yaz ve kış mevsimlerinde %70 ve %13 ile en yüksek ve düşük değerlerine ulaşmaktadır. Yıllık ve mevsimlik YSK değerlerinde yakın gelecekte en büyük artış SSP1-2.6 senaryosunda beklenmekte ancak diğer senaryolarda önemli bir değişiklik beklenmemektedir. Uzak gelecekte SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 senaryolarında YSK değerlerinde daha fazla artış beklenmekte olup yıllık %40 ve yazın yaklaşık %90 olması beklenmektedir (Şekil 34). Gözlem döneminde havzanın genel olarak YSK değerleri düşük olup batı kesimindeki Gönen ve Balıkesir arasındaki alt havzada yaklaşık %65 ile en fazladır. Havzanın orta kesiminde yakın ve uzak gelecekte genel olarak artış görülmektedir. Uzak gelecekte SSP3-7.0 senaryosunda havzanın batısı ile güneyi arasındaki bölgelerde ve Bursa çevresinde YSK değerlerinde artış olabileceği görülmektedir. SSP5-8.5 senaryosunda Bursa çevresindeki artış daha da artarak yaklaşık %45 olacağı tahmin edilmektedir (Şekil 33).

Şekil 33 ve Şekil 34'te görüldüğü üzere YSH değerleri ise YSK gibi benzer örüntüye sahip olup gözlem döneminde ortalama değeri %35 civarındadır. YSH yaklaşık %80 ile en yüksek ortalama değerine ulaşmaktadır. Yakın gelecekte SSP1-2.6 senaryosu hariç yıllık, kış ve sonbahar mevsimlerinde %50 artış beklenmekte, ilkbahar ve yaz mevsimlerinde önemli bir değişiklik öngörülmemektedir. Uzak gelecekte SSP3-7.0 ve SSP8-8.5 senaryolarında havzanın orta kesiminde Balıkesir ile Dursunbey ve Simav çevrelerinde genel bir artış olup YSH değerlerinin yaklaşık %60 olacağı hesaplanmıştır. Havzanın batı kesimindeki Gönen ve Balıkesir arasında kalan alt havzada yakın gelecekte genel bir artış beklenmekte ancak artışın uzak gelecekte SSP3-7.0 ve SSP8-8.5 senaryolarında daha da fazla olacağı ve YSH değerlerinin yaklaşık %100'ü geçeceği tahmin edilmektedir (Şekil 33). Su güvenliği parametrelerinin oransal olarak değişimlerini ifade eden su güvenliği katsayılarının yıllık ortalamalarının alansal dağılımları Şekil 35'te verilmektedir.



Şekil 35. Su güvenliği katsayılarının gözlem ve gelecek dönem değişimleri

Şekil 35 incelendiğinde YSDK değerleri Bandırma, Keles ve Tavşanlı çevrelerinde havzanın diğer bölümlerine kıyasla daha fazla ancak batı kesimindeki alt havzada en düşüktür. Yani yağışın Bandırma, Keles ve Tavşanlı çevrelerinde yeşil suya dönüşümü daha fazladır. Yakın ve uzak gelecekte havzanın batı kesimindeki alt havzada, Bursa, Uludağ ve Keles çevrelerinde YSDK değerlerinde artış olacağı Tavşanlı çevresinde değişim olmayacağı hesaplanmıştır. Genel olarak YSDK değerlerinin yakın gelecekte SSP1-2.6 senaryosunda diğer senaryolara kıyasla daha fazla yükseleceği yani yağışın yeşil suya dönüşümünün artacağı ve uzak gelecekte en fazla SSP3-7.0 senaryosunda olacağı beklenmektedir.

Gözlem döneminde Bursa ve Balıkesir çevrelerinde MSTK değerlerinin havzanın diğer kesimlerine nazaran daha fazla yani mavi su tüketimin havzaya göre nispeten baskın ve yaklaşık %10 olduğu görülmektedir. Bandırma ve Keles çevrelerinde gelecekte bir değişiklik beklenmeyip diğer bölgelerde genel olarak bir artış ve Bursa çevresinde MSTK değerlerinin %15'in üzerinde olacağı tahmin edilmektedir. Uzak gelecekteki artışın yakın geleceğe kıyasla fazla ve en büyük değişimin SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 senaryolarında olacağı öngörülmektedir. Genel olarak değişim YST'den daha fazla artacaktır (Şekil 35).

Gözlem döneminde MSKK değerleri Balıkesir, Bursa ve Tavşanlı çevrelerinde havzanın diğer bölümlerine kıyasla yüksek ve yaklaşık %40 civarındadır. Yani bu bölgelerde MSK havzaya kıyasla nispeten fazla ancak havza geneli YSK'dan daha fazla etkilenmektedir. Yakın gelecekte Bursa ve Balıkesir çevrelerinde MSKK değerlerinde senaryolar arası belirgin bir fark olmaksızın genel bir artış varken Bandırma ve Keles çevrelerinde bir değişiklik beklenmemektedir. Uzak gelecekte ise Bandırma ve Keles çevrelerinde bir değişiklik olmayacağı ancak havzanın diğer bölgelerinde MSKK değerlerinin artacağı ve SSP3-7.0 ile SSP5-8.5 senaryolarında Bursa, Balıkesir ve Tavşanlı çevrelerinde MSK'nın YSK'yı geçeceği tahmin edilmektedir (Şekil 35).

3.9. Genel Değerlendirme

Susurluk Havzası, iklim değişikliğinden en çok etkilenen Akdeniz iklimine (Diffenbaugh & Giorgi, 2012; IPCC, 2013, 2021; Keupp vd., 2019) ve havzanın kuzeydoğusundaki Uludağ'ın yer aldığı (Peel vd., 2007; Ozturk vd., 2017; Akbas & Ozdemir, 2023) karlı bir dağ iklimine birlikte sahip olduğu bir bölgede yer almaktadır (Şekil 2). Havzada genel olarak yağışların azalacağı, maksimum ve minimum sıcaklıkların artacağı

öngörülmektedir (Şekil 20 ve Şekil 25). Bu parametrelerin tetiklediği mavi ve yeşil su depolaması azalacağı, tüketimi kısıtlılığı ve hassasiyetinin artacağı öngörülmektedir. Havzanın üzerinde (Akbaş, 2018; Akbas vd., 2020), güneyindeki Gediz Havzası'nda (Okkan, 2013; Okkan & Kirdemir, 2016; Gorguner vd., 2019) ve havzayı kapsayacak şekilde eski ve yeni senaryolar kullanılarak iklim değişikliğinin su kaynaklarına olan etkisi konusunda farklı hidrometeorolojik parametreleri dikkate alarak birçok çalışma yapılmıştır (MGM, 2015; Demircan vd., 2017; Turkes vd., 2020; Bağcı vd., 2021; Gumus vd., 2023a). Bu çalışmalara ait genel bulgular ile mevcut çalışma bulguları birbirini desteklemektedir. Özellikle havzanın tarım arazilerinin, sulak alanlarının ve rezervuarlarının yoğun olduğu batı kesiminde (Şekil 27) yağışların, mavi ve yeşil suyun azalması (Şekil 31 ve Şekil 33) havzadaki su stresini zorlayacaktır. Özellikle havzadaki yağışların büyük çoğunluğunun gerçekleştiği sonbahar ve kış mevsimlerinde yağışların azalması (Şekil 18 ve Şekil 19) ve maksimum ve minimum sıcaklıkların artması (Şekil 21, Şekil 22, Şekil 24 ve Şekil 25) SSP5-8.5'e doğru daha da güçlenmesi, mevcut CO₂ emisyonlarının kötümser senaryolara yakın seyrettiği (Schwalm vd., 2020) düşünüldüğünde, havzanın gözlem dönemine kıyasla önemli zorluklarla karşılaşma ihtimalinin yüksek olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, Türkiye'de tropik günlerin artması (Erlat & Türkeş, 2013) ve kuzey yarımkürede kış süresinin azalması ve yaz süresinin artması (Wang vd., 2021) dikkate alındığında, havzada sıcaklıkların ve dolayısıyla kuraklık, yangın, bileşik olaylar gibi ekstrem olayların artabileceği daha belirgin hale gelmektedir.

Aytekin (2021) tarafından yapılan çalışmaya göre, Susurluk Havzası'nda en hassas göstergeler ormanlık alan, yüzey akışı, kuraklık, mera alanı ve maksimum sıcaklık olup büyük bir kısmı iklim değişikliğine karşı risk grubundadır. Mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlara göre bahsi geçen hassasiyetlerin artacağı ve her ne kadar gözlem döneminde MSH YSH'den düşük olsa da gelecekte MSH beş-altı kat artarak YSH'ni geçeceği (Şekil 31 ve Şekil 33) tahmin edilmektedir. Bu nedenle havzada sektörler arası ciddi riskler oluşma ihtimalinin yüksek olduğu öngörülmektedir. Mevcut ve önceki çalışmalar (Erlat & Türkeş, 2013; Turkes vd., 2020; Gumus vd., 2023a) göz önünde bulundurulduğunda, uzun kurak günlerin yaşandığı sıcaklıkların artışı ve tropikal günlerin artışı, bileşik olayların etki olasılığını artıracaktır. Bu durum, ekolojik açıdan önemli olan özellikle tarım arazilerinin, sulak alanların ve rezervuarların yoğun olduğu havzanın batı kesimini ve yüksek su tüketim baskısı tehdidi altında bulunan havzanın tümünü, su kaynaklarının planlanmasını ve yönetimini olumsuz etkileyecektir. Örneğin, ürün ekim zamanı olan ilkbaharda yağışların

azalması, ekim zamanını erteleyecek veya tarımsal deseni değiştirecek ve yeraltı suyu ve rezervuarlardan su temini ihtiyacını artıracak ve dolayısıyla MSH artacaktır. Yoğun nüfus, tarımsal faaliyet, sanayi, enerji ve su taleplerini karşılamak için yapılmış olan çok sayıda baraj ile akışa geçen su depolanacak ve bunun sonucunda Uluabat ve Manyas gllerini besleyen su miktarı da azalacaktır. Ayrıca iklim değişikliği ile sulak alanlar, karbon yutak alanlarından karbon kaynak alanlarına dönüşebileceğinden (Salimi vd., 2021) Ramsar alanları arasında yer alan (URL-12, 2024) yukarıda belirtilen gller karbon kaynak alanlarına dönüşecek ve su kaliteleri bozulacaktır.



4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, ülkemizin en yoğun nüfuslarından birine sahip, iklim değişikliğinin etkilerini gösterdiği yarı kurak Akdeniz ikliminin baskın olduğu ve dağ iklimini de içinde barındıran Susurluk Havzası'nda iklim değişikliğinin mavi ve yeşil su tabanlı su güvenliğine (kıtık ve hassasiyet) olası etkileri gelecek dönemler için incelenmiştir.

Çalışma kapsamında dokuz adet meteoroloji gözlem istasyonuna ait günlük toplam yağış ile maksimum ve minimum sıcaklık verileri, SSP1-2.6, SSP3-7.0 ve SSP5-8.5 gelecek senaryolarına sahip 14 adet genel dolaşım modeli (GDM) kullanılarak istatistiksel ölçek indirgenme (İÖİ) yöntemi ile incelenmiştir. Havzayı temsil eden en uygun dört GDM için çoklu model topluluğu ortalaması (ÇMTO, ensemble) alınarak yağış, minimum ve maksimum sıcaklık verileri elde edilmiştir. Sonrasında bu veriler SWAT modeline girilmiş ve bu modelden elde edilen su güvenliği parametrelerinin, gözlem dönemine (1979-2014) göre yakın (2030-2059) ve uzak (2070-2099) gelecekteki değişimleri incelenmiştir. Yapılan çalışma ile aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

İÖİ model kurulumuna ait sonuçlar:

- Bu çalışmada, İÖİ sırasında sayısal ağ değerlendirmesinde çevresindeki ağların kullanımının model doğruluğunu yükselttiği belirlenmiştir.
- ERA5 verileri ile kurulan İÖİ modellerinde havza özelliklerine bağlı olarak çözünürlük artışının aylık yağış tahmin performansını iyileştirdiği sonucuna varılmıştır.
- ERA5 özgün çözünürlüğü $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$ olan havza için $1,50^{\circ} \times 1,50^{\circ}$ de çözünürlüğü yaklaşık olarak aynı performansı göstermiştir.
- Havzadaki ölçülmüş yağış değerleri ile ERA5 veri setinden seçilen 18 atmosferik değişkeninden en uyumlu olanların toplam yağış, jeopotansiyel yükseklik ve bağıl nem olduğu ortaya çıkmıştır.
- Yağışlarda ÇDURE yöntemi ortalama değerlerde iyi performans standart sapma ve çarpıklık değerlerinde iyi performans göstermemiştir. Maksimum ve minimum sıcaklıklarda ise tüm değerler için iyi performans sergilemiştir.

Yağış ve sıcaklık değişimlerine ait sonuçlar:

- MPI-ESM1-2-LR, CESM2-WACCM, MPI-ESM1-2-HR ve INM-CM5-0 GDM'leri diğerlerine kıyasla yarı kurak bir havza olan Susurluk Havzası'nda daha yüksek performans göstermişlerdir.
- ÇMTO oluşturulmuş yağışların yüksek değerlerinde, sıcaklıkların ise düşük değerlerinde yanlılıklar olduğu belirlenmiştir.
- Havzanın yakın ve uzak gelecek yağışlarında yıllık 120 ile 250 mm ve %10-25 aralığında bir azalma yaşanmasının önemli kuraklık sorunlarına yol açacağı öngörülmektedir. Havzanın batı ve kuzeybatı kesimlerinde yağış azalışlarının yüksek olacağı yine sonbaharda azalışların diğer mevsimlere nazaran yüksek olacağı tahmin edilmektedir. Havzadaki yağış azalmalarının dünyanın mevcut CO₂ salımlarının SSP3-7.0 senaryosuna yakın olduğu düşünüldüğünde kuraklıklarda artışların gerçekleşme ihtimalinin yüksek olduğu ortaya çıkmaktadır.
- Maksimum sıcaklıkların yakın gelecekte önce azalacağı sonra artacağı ancak uç değerlerde artışın devamlı olacağı, minimum sıcaklıkların maksimum sıcaklıklara kıyasla daha hızlı artacağı öngörülmektedir. Sıcaklıkların SSP5-8.5 senaryosuna doğru sıcaklık şiddetlerin artacağı öngörülmektedir. Artışların daha çok Balıkesir ve Bandırma'nın yer aldığı batı ve kuzey kesimlerinde, azalışların ise Uludağ çevresinde olacağı tahmin edilmektedir. Buna göre sıcak bölgelerin soğuk bölgelere kıyasla daha hızlı ısınacağı söylenebilir.

Su güvenliği parametrelerinin değişimlerine ait sonuçlar:

- Havzanın mavi su depolamasında (MSD) uzak gelecekte %70'e varan azalma olacağı ve Balıkesir ile Tavşanlı çevrelerinde en düşük seviyelerin görülebileceği belirlenmiştir. Bunun sonucu olarak önemli kuraklıkların yaşanabileceği ve ISIMIP verilerine göre uzak gelecekte mavi su tüketiminde (MST) %50'ye varan artış da dikkate alındığında suya olan talepleri karşılamada sorunların ve hassasiyetlerin artabileceği öngörülmektedir. Bursa çevresinde en yüksek olan MST değerleri artarak konumunu koruyacağı da dikkate alındığında, özellikle bu bölgede iklim kaynaklı önemli sorunlar olabileceği tahmin edilmektedir.
- MSD ve MST'ye bağlı olarak hesaplanan mavi su kıtlığının (MSK) %10-20 arasında değişen değerinin yakın gelecekte önemli bir değişim göstermesi beklenmemektedir. Uzak gelecekte SSP3-7.0 senaryosunda ise en büyük artış oranı ile ortalama %40 olacağı ve yaz mevsiminde havza ortalamasının %100'ü geçeceği, yakın ve uzak gelecekte Bursa, Balıkesir ve Tavşanlı çevrelerinde en yüksek değerlere ulaşacağı öngörülmektedir. Bu durumda su ile ilgili paydaşlar arası artan rekabet ve çatışma potansiyeli riskinin çok yüksek olacağı tahmin edilmektedir. Ayrıca mavi su hassasiyetinin MSK ile benzer örüntü ve özellikleri taşıdığı ve değerinin yaklaşık %25 daha fazla olacağı sonucuna varılmıştır.
- Havzanın yıllık yeşil su depolamasında yakın gelecekte önemli bir değişiklik beklenmeyip uzak gelecekte SSP3-7.0 senaryosunda en büyük azalma öngörülmektedir. Gönen ve Simav arasındaki bölgede ise azalarak en düşük değerlerini koruyacağı tahmin edilmektedir. Yeşil su tüketiminin yakın gelecekte önemli bir değişiklik göstermeyeceği belirlenmiştir. Bu değer uzak gelecekte SSP3-7.0 senaryosunda en büyük azalma göstermiş olmasına rağmen kışın SSP5-8.5 senaryosunda artması öngörülmektedir. Bunlara bağlı olarak yeşil su kıtlığı (YSK) yakın gelecekte önemli bir değişiklik göstermeyip, uzak gelecekte SSP3-7.0 senaryosunda yaklaşık %40 değerine ulaşacağı belirlenmiştir. Havzanın batısında yüksek YSK değerlerinin uzak gelecekte %80'e kadar ulaşabileceği, yani toprak neminin azalması ve buharlaşmanın artmasıyla mavi suya olan talebin artabileceği ve tarımsal ürün veriminin ciddi oranda azalabileceği tahmin edilmektedir.

- Yeşil su depolama katsayısı genel olarak en fazla yükselişi yakın ve uzak gelecekte SSP1-2.6 ve SSP3-7.0 senaryolarında yapacağı öngörülmektedir. Bu katsayının uzak gelecekte Keles ve Tavşanlı çevrelerinde %95'i geçerek en yüksek değerine ulaşacağı, yani yağışların yeşil suya dönüşeceği öngörülmüştür. Bu durumun yüzeysel akış ile sediment verimini azaltabileceği ve bitki örtüsünü arttırabileceği belirlenmiştir.
- Havzada genel olarak YSK'nın MSK'dan daha yüksek olduğu ancak Bursa ve Balıkesir çevrelerinin nispeten daha fazla MSK çekmekte olduğu belirlenmiştir. Uzak gelecekte yakın geleceğe kıyasla MSK şiddetinin ve baskınlığının artacağı öngörülmektedir. Bu durumun tarım, sanayi vb. paydaşlar arası artan rekabet ve çatışma potansiyel riskini önemli derecede arttırabileceği tahmin edilmektedir.

5. ÖNERİLER

Yapılan çalışmada yağış, maksimum ve minimum sıcaklıkların, su güvenliği parametrelerinin geleceğe yönelik olası değişimleri incelenmiş olup çalışma ile ilgili öneriler aşağıda sunulmuştur:

- Yakın veya uzak sayısal ağların uzaklıklarının ortalamaları alınarak incelenmiş olup farklı yöntemler ile sayısal ağ sayısı veya uzaklıkları ile bağımsız değişken seçimi bilgi teorisi, farklı korelasyon ve regresyon yöntemleri, benzerlik indeksleri gibi yöntemlerle belirlenebilir. Ayrıca yağış ve sıcaklık parametrelerine uygulanan İÖİ'nin nem, rüzgar ve güneş radyasyonu gibi farklı parametreler için de yapılması ile hidrolojik döngü bileşenlerinin geleceğe yönelik ayrıntılı öngörü imkanı sunabilir.
- SWAT yerine mezo(orta) ölçekli hidrolojik model (mHM) ve variable infiltration capacity (VIC) gibi hidrolojik modeller ile yapay zeka yöntemleri kullanılabilir.
- Su güvenliği hesabı için sadece mavi ve yeşil su kullanılmış olup gri su da bu hesaba dahil edilerek sektörler için farklı türdeki kuraklıkların su güvenliğine geçişleri, süreleri ve etkileri yanında taşkın, sıcak hava dalgası vb. uç olayların birlikte veya ardışık olma durumları mekana ve zamana bağlı olarak dikkate alınarak incelenebilir.
- Havzanın iklim değişikliğine karşı en çok etkilenebilecek alan olarak batı ve kuzey doğu kesiminde su yönetim planları kısa ve uzun vadede daha dikkatli şekilde yenilenebilir ve uygulanabilir.
- Havzada yağış azalışından ve sıcaklık artışından önemli derecede etkilenebilecek bitki deseninden, iklim değişikliğine dayanıklı ürünlerin tercih edilmesi; havzada suyun akışa geçmeden sızma oranlarını artırıcı teraslama ve ağaçlandırma yapılması; baraj gölleri ve göletlerin üzerlerine buharlaştırmayı azaltıcı ve enerji sağlayacak güneş enerji panelleri yerleştirilmesi; buharlaşmanın daha az olduğu yeraltı barajlarının tercih edilmesi, şehirlerde sızmayı artırıcı ek peyzaj planlaması ve ısı adası etkisini azaltıcı ağaç dikimlerinin gerçekleştirilmesi gibi uygulamaların iklim değişimine uyum bakımından dikkate alınması gerekmektedir.

- Havzada su kullanımının planlanması su yılı için yapılmalıdır. Bunun yanında karar vericiler tarafından su tüketimini azaltacak sulama yöntemlerine geçiş ve diğer sektörlerin etkin su kullanımı için eğitim ve teşvik uygulamalarının planlanması gerekmektedir.



6. KAYNAKLAR

- Abbaspour, K. C. (2015). SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty programs—a user manual. *Eawag: Dübendorf, Switzerland*.
- Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research*, 45(10), W10434. <https://doi.org/10.1029/2008WR007615>
- Abbaspour, K. C., Vaghefi, S. A., & Srinivasan, R. (2017). A guideline for successful calibration and uncertainty analysis for soil and water assessment: A review of papers from the 2016 international SWAT conference. *Water*, 10(1), 6. <https://doi.org/10.3390/w10010006>
- Afshar, M. H., Yilmaz, M. T., & Crow, W. T. (2019). Impact of rescaling approaches in simple fusion of soil moisture products. *Water Resources Research*, 55(9), 7804–7825. <https://doi.org/10.1029/2019WR025111>
- Ahmed, K., Sachindra, D. A., Shahid, S., Demirel, M. C., & Chung, E.S. (2019). Selection of multi-model ensemble of general circulation models for the simulation of precipitation and maximum and minimum temperature based on spatial assessment metrics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(11), 4803–4824. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4803-2019>
- Ahmed, K., Sachindra, D. A., Shahid, S., Iqbal, Z., Nawaz, N., & Khan, N. (2020). Multi-model ensemble predictions of precipitation and temperature using machine learning algorithms. *Atmospheric Research*, 236, 104806. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104806>
- Akbaş, A. (2018). *Marmara Denizi Drenaj Havzasında Yağış-Akış İlişkileri*. İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Akbas, A., Freer, J., Ozdemir, H., Bates, P. D., & Turp, M. T. (2020). What about reservoirs? Questioning anthropogenic and climatic interferences on water availability. *Hydrological Processes*, 34(26), 5441–5455. <https://doi.org/10.1002/hyp.13960>
- Akbas, A., & Ozdemir, H. (2023). Influence of atmospheric circulation on the variability of hydroclimatic parameters in the Marmara Sea river basins. *Hydrological Sciences Journal*, 68(9), 1229–1240. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2206970>
- Akbaş, A., & Özdemir, H. (2018). Marmara Denizi havzasının hidroklimatolojik dinamiklerinin belirlenmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, (70), 123–131. <https://doi.org/https://doi.org/10.17211/tcd.401265>
- Akçakaya, A., Atay, H., & Demir, Ö. (2013). İklim Değişikliği Senaryolarında Yeni Dönem: Paralel Yaklaşım ve Temsili Konsantrasyon Rotaları (RCPs). *6th Atmospheric Science Symposium-ATMOS*, April, İstanbul.

- Akçakaya, A., Sümer, U., Demircan, M., Demir, Ö., Atay, H., Eskioğlu, O., ... Çukurçayır, F. (2015). *Yeni senaryolar ile Türkiye iklim projeksiyonları ve iklim değişikliği*. TR2015-CC Araştırma dDairesi Başkanlığı Klimatoloji Şube Müdürlüğü.
- Aldaya, M. M., Rodriguez, C. I., Fernandez-Poulussen, A., Merchan, D., Beriain, M. J., & Llamas, R. (2020). Grey water footprint as an indicator for diffuse nitrogen pollution: The case of Navarra, Spain. *Science of the Total Environment*, 698, 134338. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134338>
- Amjad, M., Yilmaz, M. T., Yucel, I., & Yilmaz, K. K. (2020). Performance evaluation of satellite- and model-based precipitation products over varying climate and complex topography. *Journal of Hydrology*, 584, 124707. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124707>
- Apak, G., & Ubay, B. (2007). *İklim Değişikliği Birinci Ulusal Bildirimi: Birleşmiş Milletler iklim değişikliği çerçeve sözleşmesi kapsamında*. Ankara: Çevre ve Orman Bakanlığı; Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü.
- Aydın, O., Ünalı, Ü. E., Duman, N., Çiçek, İ., & Türkoğlu, N. (2017). Türkiye’de su kıtlığının mekânsal ölçekte değerlendirilmesi. *Türk Coğrafya Dergisi*, (68), 11-18. <https://doi.org/10.17211/tcd.314754>
- Aytekin, M. (2021). *İklim değişikliğine uyum çalışmalarını destekleyici bir havza duyarlılık değerlendirme metodunun geliştirilmesi*. İstanbul Üniversitesi-Cerrahpasa, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Bağcı, S. Ç., Yücel, İ., Düzenli, E., & Yılmaz, M. T. (2021). Intercomparison of the expected change in the temperature and the precipitation retrieved from CMIP6 and CMIP5 climate projections: A Mediterranean hot spot case, Turkey. *Atmospheric Research*, 256, 105576. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105576>
- Baghanam, A. H., Nourani, V., & Bejani, M. (2022). AI-Based Statistical Downscaling of Precipitation and Temperature via Convolutional Neural Network Using Nonlinear Predictor Screening Approach. Gökçekuş, H., Kassem, Y. (eds) *Climate Change, Natural Resources and Sustainable Environmental Management. NRSEM 2021. Environmental Earth Sciences*. Springer, Cham. (ss. 129–138). https://doi.org/10.1007/978-3-031-04375-8_15
- Bakker, K. (2012). Water security: research challenges and opportunities. *Science*, 337(6097), 914–915. <https://doi.org/10.1126/science.1226337>
- Bayazıt, M. (1995). *Hidroloji*. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Beecham, S., Rashid, M., & Chowdhury, R. K. (2014). Statistical downscaling of multi-site daily rainfall in a South Australian catchment using a generalized linear model. *International Journal of Climatology*, 34(14), 3654–3670. <https://doi.org/10.1002/joc.3933>
- Bettolli, M. L., & Penalba, O. C. (2018). Statistical downscaling of daily precipitation and temperatures in southern La Plata Basin. *International Journal of Climatology*, 38(9), 3705–3722. <https://doi.org/10.1002/joc.5531>

- Beven, K. (2012). *Rainfall-Runoff modelling*. Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781119951001>
- Borges, P. de A., Barfus, K., Weiss, H., & Bernhofer, C. (2017). Extended predictor screening, application and added value of statistical downscaling of a CMIP5 ensemble for single-site projections in Distrito Federal, Brazil. *International Journal of Climatology*, 37(1), 46–65. <https://doi.org/10.1002/joc.4686>
- Caloiero, T., Veltri, S., Caloiero, P., & Frustaci, F. (2018). Drought analysis in Europe and in the Mediterranean basin using the standardized precipitation index. *Water*, 10(8), 1043. <https://doi.org/10.3390/w10081043>
- Campitelli, E. (2021). metR: Tools for easier analysis of meteorological fields. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2593516>, R package version 0.14.1, <https://github.com/eliocamp/metR>, <https://eliocamp.github.io/metR/>.
- Cannon, A. J. (2023). MBC: Multivariate bias correction of climate model outputs. <https://cran.r-project.org/package=MBC>.
- Cannon, A. J., Sobie, S. R., & Murdock, T. Q. (2015). Bias correction of gcm precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28(17), 6938–6959. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>
- Chen, J., Brissette, F. P., & Leconte, R. (2014). Assessing regression-based statistical approaches for downscaling precipitation over North America. *Hydrological Processes*, 28(9), 3482–3504. <https://doi.org/10.1002/hyp.9889>
- Chen, S. T., Yu, P. S., & Tang, Y. H. (2010). Statistical downscaling of daily precipitation using support vector machines and multivariate analysis. *Journal of Hydrology*, 385(1–4), 13–22. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.021>
- Coşkun, S. (2022). *Bursa kentinde su kıtlığının iklim değişikliği ve nüfus senaryoları açısından makine öğrenmesi kullanılarak incelenmesi*. Bursa Uludağ Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa
- Crawford, T., Betts, N., & Favis-Mortlock, D. (2007). GCM grid-box choice and predictor selection associated with statistical downscaling of daily precipitation over Northern Ireland. *Climate Research*, 34, 145–160. <https://doi.org/10.3354/cr034145>
- Cüceloğlu, G. (2019). *İklim Değişikliğinin İstanbul'un Yüzeysel Su Kaynaklarına Etkisi ve Kuraklık Dirençli Bütünleşik Su Yönetimi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Cüceloğlu, G., Abbaspour, K.C., & Ozturk, I. (2017). Assessing the water-resources potential of Istanbul by using a soil and water assessment tool (SWAT) hydrological Model. *Water*, 9(10), 814. <https://doi.org/10.3390/w9100814>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in

- Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Dabanlı, İ. (2017). *Türkiye’de İklim Değişikliğinin Yağış-Sıcaklığa Etkisi ve Kuraklık Analizi: Akarçay Örneği*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi, İstanbul.
- Das, J., & Nanduri, U. V. (2018). Assessment and evaluation of potential climate change impact on monsoon flows using machine learning technique over Wainganga River basin, India. *Hydrological Sciences Journal*, 63(7), 1020–1046. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1469757>
- Demir, İ., Kılıç, G., & Coşkun, M. (2008a). Türkiye ve bölgesi için PRECIS bölgesel iklim modeli çalışmaları. *İklim Değişikliği ve Çevre*, 1(1), 11–17.
- Demir, İ., Kılıç, G., & Coşkun, M. (2008b). PRECIS bölgesel iklim modeli ile Türkiye için iklim öngörülleri: HadAMP3 SRES A2 senaryosu. *Atmosfer Bilimleri Sempozyumu, Bildiriler Kitabı* s 365–373. İstanbul.
- Demircan, M., Gürkan, H., Eskioğlu, O., Arabacı, H., & Coşkun, M. (2017). Climate change projections for Turkey: Three models and two scenarios. *Turkish Journal of Water Science and Management*, 1(1), 22–43. <https://doi.org/10.31807/tjwsm.297183>
- Diffenbaugh, N. S., & Giorgi, F. (2012). Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble. *Climatic Change*, 114(3–4), 813–822. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0570-x>
- Duzenli, E., Tabari, H., Willems, P., & Yilmaz, M. T. (2018). Decadal variability analysis of extreme precipitation in Turkey and its relationship with teleconnection patterns. *Hydrological Processes*, 32(23), 3513–3528. <https://doi.org/10.1002/hyp.13275>
- Ekstrom, M., Grose, M. R., & Whetton, P. H. (2015). An appraisal of downscaling methods used in climate change research. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6(3), 301–319. <https://doi.org/10.1002/wcc.339>
- Emmanouil, S., Langousis, A., Nikolopoulos, E. I., & Anagnostou, E. N. (2021). An ERA-5 Derived CONUS-wide high-resolution precipitation dataset based on a refined parametric statistical downscaling framework. *Water Resources Research*, 57(6). e2020WR029548 <https://doi.org/10.1029/2020WR029548>
- Erlat, E., & Türkeş, M. (2013). Observed changes and trends in numbers of summer and tropical days, and the 2010 hot summer in Turkey. *International Journal of Climatology*, 33(8), 1898–1908. <https://doi.org/10.1002/joc.3556>
- Falkenmark, M., & Rockström, J. (2006). The new blue and green water paradigm: Breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water*

- Resources Planning and Management*, 132(3), 129–132. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2006\)132:3\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(129))
- Fistikoglu, O., & Okkan, U. (2011). Statistical downscaling of monthly precipitation using NCEP/NCAR reanalysis data for Tahtali River Basin in Turkey. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(2), 157–164. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000300](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000300)
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547–1578. <https://doi.org/10.1002/joc.1556>
- Friedman, J. H. (1991). Multivariate Adaptive Regression Splines. *The Annals of Statistics*, 19(1), 1–67. <http://www.jstor.org/stable/2241837> adresinden erişildi.
- Gao, J., Sheshukov, A. Y., Yen, H., Douglas-Mankin, K. R., White, M. J., & Arnold, J. G. (2019). Uncertainty of hydrologic processes caused by bias-corrected CMIP5 climate change projections with alternative historical data sources. *Journal of Hydrology*, 568, 551–561. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.041>
- Giorgi, F., & Mearns, L. O. (2002). Calculation of average, uncertainty range, and reliability of regional climate changes from AOGCM simulations via the “reliability ensemble averaging”(REA) method. *Journal of climate*, 15(10), 1141–1158.
- Gorguner, M., Kavvas, M. L., & Ishida, K. (2019). Assessing the impacts of future climate change on the hydroclimatology of the Gediz Basin in Turkey by using dynamically downscaled CMIP5 projections. *Science of the Total Environment*, 648, 481–499. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.167>
- Grose, M. R., Narsey, S., Delage, F. P., Dowdy, A. J., Bador, M., Bosch, G., ... & Power, S. (2020). Insights from CMIP6 for Australia’s future climate. *Earth’s Future*, 8(5), e2019EF001469. <https://doi.org/10.1029/2019EF001469>
- Gumus, B., Oruc, S., Yucel, I., & Yilmaz, M. T. (2023a). Impacts of climate change on extreme climate indices in Türkiye driven by high-resolution downscaled CMIP6 climate models. *Sustainability*, 15(9), 7202. <https://doi.org/10.3390/su15097202>
- Gumus, V., Simsek, O., & Avsaroglu, Y. (2023b). Evaluation of long-term monthly mean streamflow trend in the Mediterranean basins using different methods. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(3–4), 1369–1382. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04293-0>
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2), 80–91. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Gutowski, W. J., Decker, S. G., Donavan, R. A., Pan, Z., Arritt, R. W., & Takle, E. S. (2003). Temporal–spatial scales of observed and simulated precipitation in central U.S.

- climate. *Journal of Climate*, 16(22), 3841–3847. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3841:TSSOAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3841:TSSOAS>2.0.CO;2)
- Haltas, I., Yildirim, E., Oztas, F., & Demir, I. (2021). A comprehensive flood event specification and inventory: 1930–2020 Turkey case study. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 56, 102086. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102086>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hasanean, H., & Almazroui, M. (2015). Rainfall: Features and Variations over Saudi Arabia, A Review. *Climate*, 3(3), 578–626. <https://doi.org/10.3390/cli3030578>
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Bryan, B. A. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications*, 12(1), 4667. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3>
- Hebbali, A. (2020). olsrr: Tools for Building OLS Regression Models , R package version 0.5.3. <https://cran.r-project.org/package=olsrr>.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hertig, E., & Jacobeit, J. (2013). A novel approach to statistical downscaling considering nonstationarities: Application to daily precipitation in the mediterranean area. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 118(2), 520–533. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50112>
- Hessami, M., Gachon, P., & Ouarda, T. B. M. J. (2008). Automated regression-based statistical downscaling tool. *Environmental Modelling & Software*, 23(6), 813–834. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.10.004>
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Washington: Routledge. <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/962651468332944887/the-water-footprint-assessment-manual-setting-the-global-standard>.
- Horton, P. (2022). Analogue methods and ERA5: Benefits and pitfalls. *International Journal of Climatology*, 42(7), 4078–4096. <https://doi.org/10.1002/joc.7484>
- Huang, J., Zhang, J., Zhang, Z., Xu, C., Wang, B., & Yao, J. (2011). Estimation of future precipitation change in the Yangtze River basin by using statistical downscaling method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25(6), 781–792. <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0441-9>
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, et al.]*. Cambridge, United Kingdom and New

York, NY, USA
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_all_final.pdf.

IPCC. (2021). *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, et al.]. Cambridge, United Kingdom.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf.

IPCC. (2023). *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. Interlaken, Switzerland.
<https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.

Jafarzadeh, A., Pourreza-Bilondi, M., Khashei Siuki, A., & Ramezani Moghadam, J. (2021). Examination of various feature selection approaches for daily precipitation downscaling in different climates. *Water Resources Management*, 35, 407-427.
<https://doi.org/10.1007/s11269-020-02701-6>

Jewell, J. (2011). The IEA model of short-term energy security (MOSES). *IEA Energy Papers*. 08 Şubat 2024 tarihinde https://www.oecd-ilibrary.org/energy/the-iea-model-of-short-term-energy-security-moses_5k9h0wd2ghlv-en adresinden erişildi.

Jouma, N. (2019). *Sultan Sazlığı'nda İklim Değişikliği ve Arazi Kullanımı/Örtüsü Değişimlerinin Etkilerinin SWAT ile Modellenmesi*. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Kayseri.

Karaca, M., Deniz, A., & Tayanç, M. (2000). Cyclone track variability over Turkey in association with regional climate. *International Journal of Climatology*, 20(10), 1225–1236.
[https://doi.org/10.1002/1097-0088\(200008\)20:10<1225::AID-JOC535>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1097-0088(200008)20:10<1225::AID-JOC535>3.0.CO;2-1)

Karşılı, C. (2011). *Türkiye'de akarsu havzalarında kişi başına düşen su miktarının coğrafi bilgi sistemleriyle analizi*. Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Keupp, L., Hertig, E., Kaspar-Ott, I., Pollinger, F., Ring, C., Paeth, H., & Jacobeit, J. (2019). Weighted multi-model ensemble projection of extreme precipitation in the Mediterranean region using statistical downscaling. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(3–4), 1269–1295. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02851-7>

Khan, M. S., Coulibaly, P., & Dibike, Y. (2006). Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology*, 319(1–4), 357–382.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.035>

Khan, N., Shahid, S., Ahmed, K., Wang, X., Ali, R., Ismail, T., & Nawaz, N. (2020). Selection of GCMs for the projection of spatial distribution of heat waves in Pakistan. *Atmospheric Research*, 233, 104688. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104688>

Kisi, O., & Parmar, K. S. (2016). Application of least square support vector machine and multivariate adaptive regression spline models in long term prediction of river water

- pollution. *Journal of Hydrology*, 534, 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.12.014>
- Komuscu, A. U., & Celik, S. (2013). Analysis of the Marmara flood in Turkey, 7–10 September 2009: an assessment from hydrometeorological perspective. *Natural Hazards*, 66(2), 781–808. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0521-x>
- Körük, A. E., Kankal, M., Yıldız, M. B., Akçay, F., Şan, M., & Nacar, S. (2023). Trend analysis of precipitation using innovative approaches in northwestern Turkey. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 131, 103416. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2023.103416>
- Lamontagne, J. R., Barber, C. A., & Vogel, R. M. (2020). Improved estimators of model performance efficiency for skewed hydrologic data. *Water Resources Research*, 56(9), e2020WR027101. <https://doi.org/10.1029/2020WR027101>
- Lange, S. (2019). Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). *Geoscientific Model Development*, 12(7), 3055–3070. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3055-2019>
- Lehner, B., Verdin, K., & Jarvis, A. (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 89(10), 93. <https://doi.org/10.1029/2008EO100001>
- Li, C., Sinha, E., Horton, D. E., Diffenbaugh, N. S., & Michalak, A. M. (2014). Joint bias correction of temperature and precipitation in climate model simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(23), 13,153–13,162. <https://doi.org/10.1002/2014JD022514>
- Li, X., Fang, G., Wei, J., Arnault, J., Laux, P., Wen, X., & Kunstmann, H. (2023). Evaluation and projection of precipitation and temperature in a coastal climatic transitional zone in China based on CMIP6 GCMs. *Climate Dynamics*, 61(7–8), 3911–3933. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06781-z>
- Liang, Y., Cai, Y., Wang, X., Li, C., & Liu, Q. (2021). Water security assessment with the improvement of modifying the boundary consistency between footprint and provision. *Science of the Total Environment*, 801, 149639. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149639>
- Lin, G. F., Chang, M. J., & Wang, C. F. (2017). A novel spatiotemporal statistical downscaling method for hourly rainfall. *Water Resources Management*, 31(11), 3465–3489. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1679-5>
- Liu, W., Fu, G., Liu, C., & Charles, S. P. (2013). A comparison of three multi-site statistical downscaling models for daily rainfall in the North China Plain. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(3–4), 585–600. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0692-0>
- Liu, J., Yang, H., Gosling, S. N., Kummu, M., Flörke, M., Pfister, S., ...& Oki, T. (2017). Water scarcity assessments in the past, present, and future. *Earth's Future*, 5(6), 545–559. <https://doi.org/10.1002/2016EF000518>

- Liu, Y., Feng, J., Shao, Y., & Li, J. L. (2019). Identify optimal predictors of statistical downscaling of summer daily precipitation in China from three-dimensional large-scale variables. *Atmospheric Research*, 224, 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.022>
- Mallows, C. L. (1973). Some comments on Cp. *Technometrics*, 15(4), 661–675. <https://doi.org/10.1080/00401706.1973.10489103>
- Mao, G., Liu, J., Han, F., Meng, Y., Tian, Y., Zheng, Y., & Zheng, C. (2020). Assessing the interlinkage of green and blue water in an arid catchment in Northwest China. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(3), 933–953. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00406-3>
- Maraun, D. (2016). Bias correcting climate change simulations - a critical review. *Current Climate Change Reports*, 2(4), 211–220. <https://doi.org/10.1007/s40641-016-0050-x>
- Maraun, D., Wetterhall, F., & Ireson, A. M. (2010). Precipitation downscaling under climate change: recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3), RG3003. <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>
- Me, O., Balmaceda-Huarte, R., & Bettolli, M. (2022). Multi-model ensemble of statistically downscaled GCMs over southeastern South America: historical evaluation and future projections of daily precipitation with focus on extremes. *Climate Dynamics*, 59(9–10), 3051–3068. <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06236-x>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202–216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Mujumdar, P. P., & Nagesh Kumar, D. (2012). *Floods in a changing climate: Hydrologic modeling*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139088428>
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., & Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6), 1763–1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Nacar, S. (2020). *İklim Değişikliğinin Doğu Karadeniz Havzası Sıcaklık ve Yağış Parametreleri Üzerindeki Olası Etkilerinin İncelenmesi*. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Nacar, S., Kankal, M., & Okkan, U. (2022a). Doğu karadeniz havzası lokal meteorolojik değişkenleri için bir ölçek indirgeme uygulaması ve senaryo esaslı öngörüler. *Teknik Dergi*, 33(6), 12877–12911. <https://doi.org/10.18400/tekderg.895112>
- Nacar, S., Kankal, M., & Okkan, U. (2022b). Evaluation of the suitability of NCEP/NCAR, ERA-Interim and, ERA5 reanalysis data sets for statistical downscaling in the Eastern Black Sea Basin, Turkey. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(2), 39. <https://doi.org/10.1007/s00703-022-00878-6>

- Nasseri, M., Tavakol-Davani, H., & Zahraie, B. (2013). Performance assessment of different data mining methods in statistical downscaling of daily precipitation. *Journal of Hydrology*, 492, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.017>
- Nguyen, H., Mehrotra, R., & Sharma, A. (2020). Assessment of climate change impacts on reservoir storage reliability, resilience, and vulnerability using a multivariate frequency bias correction approach. *Water Resources Research*, 56(2), e2019WR026022. <https://doi.org/10.1029/2019WR026022>
- Nguyen, T. V., Dietrich, J., Dang, T. D., Tran, D. A., Van Doan, B., Sarrazin, F. J., ... & Srinivasan, R. (2022). An interactive graphical interface tool for parameter calibration, sensitivity analysis, uncertainty analysis, and visualization for the Soil and Water Assessment Tool. *Environmental Modelling and Software*, 156, 105497. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105497>
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., ... & Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... Sanderson, B. M. (2016). The Scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Okkan, U. (2013). *İklim Değişikliğinin Akarsu Akışları Üzerindeki Etkilerinin Değerlendirilmesi*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Okkan, U. (2016). *İklim Değişikliği Senaryoları Altında Gelecekteki Sulama ve İçme Suyu Yeterliliğinin İrdelenmesi: Gediz Havzası Örneği*. Ankara: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu. <https://search.trdizin.gov.tr/tr/yayin/detay/616013/iklim-degisikligi-senaryolari-altinda-gelecekteki-sulama-ve-icme-suyu-yeterliliğinin-irdelenmesi-gediz-havzasi-ornegi>
- Okkan, U., & Inan, G. (2015). Bayesian learning and relevance vector machines approach for downscaling of monthly precipitation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(4), 04014051. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001024](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001024)
- Okkan, U., & Kirdemir, U. (2016). Downscaling of monthly precipitation using CMIP5 climate models operated under RCPs. *Meteorological Applications*, 23(3), 514–528. <https://doi.org/10.1002/met.1575>
- Oruc, S. (2022). Performance of bias corrected monthly CMIP6 climate projections with different reference period data in Turkey. *Acta Geophysica*, 70(2), 777–789. <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00731-9>
- Ödensoy, C. (2017) İklim değişikliğinden kaynaklanan su kıtlığı risk haritalaması: Çok kriterli karar analizinin analitik hiyerarşi süreç yöntemleriyle birleştirilmesi Boğaziçi Üniversitesi, Çevre Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

- Özdemir, H., & Abdullah, A. (2023). The Effects of Spatial Resolution Variability of Digital Elevation Models on Flood Hazard Analysis. *Journal of Geography*, (46), 137-156. <https://doi.org/10.26650/JGEOG2023-1177718>
- Ozturk, M. Z., Cetinkaya, G., & Aydin, S. (2017). Climate types of Turkey according to Köppen-Geiger climate classification. *Journal of Geography*, 35, 17-27. <https://doi.org/10.26650/JGEOG295515>
- Padowski, J. C., & Jawitz, J. W. (2012). Water availability and vulnerability of 225 large cities in the United States. *Water Resources Research*, 48, W12529. <https://doi.org/10.1029/2012WR012335>
- Pardoe, I. (2013). *Applied Regression Modeling*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118345054.ch5>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Peker, I. B., & Cüceloğlu, G. (2022). SWAT (Soil and Water Assessment Tool) modeline genel bir bakış ve modelin Türkiye'deki uygulamaları. *Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik*, 1(1), 9-26.
- Peker, I. B., & Sorman, A. A. (2021). Application of SWAT using snow data and detecting climate change impacts in the mountainous eastern regions of Turkey. *Water*, 13(14), 1982. <https://doi.org/10.3390/w13141982>
- Pour, S., Harun, S., & Shahid, S. (2014). Genetic programming for the downscaling of extreme rainfall events on the east coast of Peninsular Malaysia. *Atmosphere*, 5(4), 914-936. <https://doi.org/10.3390/atmos5040914>
- Rashid, M. M., Beecham, S., & Chowdhury, R. K. (2015). Statistical downscaling of CMIP5 outputs for projecting future changes in rainfall in the Onkaparinga catchment. *Science of the Total Environment*, 530-531(2015), 171-182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.05.024>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & 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. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>
- Rockström, J., Falkenmark, M., Karlberg, L., Hoff, H., Rost, S., & Gerten, D. (2009). Future water availability for global food production: The potential of green water for increasing resilience to global change. *Water Resources Research*, 45, W00A12. <https://doi.org/10.1029/2007WR006767>
- Rodrigues, D. B. B., Gupta, H. V., & Mendiola, E. M. (2014). A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. *Water Resources Research*, 50(9), 7187-7205. <https://doi.org/10.1002/2013WR014274>

- Saengsawang, S., Pankhao, P., Kaprom, C., & Sriwongsitanon, N. (2017). Projections of future rainfall for the upper Ping River Basin using regression-based downscaling. *Advances in Climate Change Research*, 8(4), 256–267. <https://doi.org/10.1016/j.accres.2017.11.001>
- Salehie, O., Hamed, M. M., Ismail, T. B., & Shahid, S. (2022). Projection of droughts in Amu river basin for shared socioeconomic pathways CMIP6. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(3-4), 1009-1027. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04097-2>
- Salimi, S., Almukhtar, S. A. A. N., & Scholz, M. (2021). Impact of climate change on wetland ecosystems: A critical review of experimental wetlands. *Journal of Environmental Management*, 286, 112160. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112160>
- Şan, M., Nacar, S., Kankal, M., & Bayram, A. (2023). Daily precipitation performances of regression-based statistical downscaling models in a basin with mountain and semi-arid climates. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(4), 1431–1455. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02345-5>
- Sarhadi, A., Burn, D. H., Johnson, F., Mehrotra, R., & Sharma, A. (2016). Water resources climate change projections using supervised nonlinear and multivariate soft computing techniques. *Journal of Hydrology*, 536, 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.02.040>
- Schneider, C. (2013). Three Shades of Water: Increasing Water Security with Blue, Green, and Gray Water. *CSA News*, 58(10), 4–9. <https://doi.org/10.2134/csa2013-58-10-1>
- Schuol, J., Abbaspour, K. C., Srinivasan, R., & Yang, H. (2008). Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *Journal of Hydrology*, 352(1–2), 30–49. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.025>
- Schwalm, C. R., Glendon, S., & Duffy, P. B. (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(33), 19656–19657. <https://doi.org/10.1073/pnas.2007117117>
- Scott, C. A., Meza, F. J., Varady, R. G., Tiessen, H., McEvoy, J., Garfin, G. M., ... & Montaña, E. (2013). Water security and adaptive management in the arid Americas. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(2), 280–289. <https://doi.org/10.1080/00045608.2013.754660>
- Seker, M., & Gumus, V. (2022). Projection of temperature and precipitation in the Mediterranean region through multi-model ensemble from CMIP6. *Atmospheric Research*, 280, 106440. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106440>
- Şen, Z. (2015). Su bütçesi çalışmaları ve türkiye'nin bugün ve gelecekteki su verimliliğinin belirlenmesi. *Türkiye Su Bütçesinin Belirlenmesi Çalıştayı ve Türkiye Ulusal Hidroloji Komisyonu (TUHK) Toplantısı*. İstanbul.
- Şen, Z. (2020). Up-to-date statistical essentials in climate change and hydrology: a review. *International Journal of Global Warming*, 22(4), 392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1504/IJGW.2020.111515>

- Şen, Z., Uyumaz, A., Öztopal, A., Cebeci, M., Küçükmehtetoğlu, M., Erdik, T., ... & Ceylan, V. (2010). *Final report on the impacts of climate change on İstanbul and Turkey water resources. İSKİ Project.*
- Sippel, S., Otto, F. E. L., Forkel, M., Allen, M. R., Guillod, B. P., Heimann, M., ... Mahecha, M. D. (2016). A novel bias correction methodology for climate impact simulations. *Earth System Dynamics*, 7(1), 71–88. <https://doi.org/10.5194/esd-7-71-2016>
- Sobhani, P., Esmaeilzadeh, H., Deljouei, A., Wolf, I. D., Marcu, M. V., & Sadeghi, S. M. M. (2023). Assessing water security and footprint in hypersaline Lake Urmia. *Ecological Indicators*, 155, 110955. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110955>
- Song, F., Zhang, G.J., Ramanathan, V., & Leung, L. R. (2022). Trends in surface equivalent potential temperature: A more comprehensive metric for global warming and weather extremes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(6). <https://doi.org/10.1073/pnas.2117832119>
- Sullivan, C.A. (2011). Quantifying water vulnerability: a multi-dimensional approach. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25, 627-640. <https://doi.org/10.1007/s00477-010-0426-8>
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J., & Barbosa, P. (2015). European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach. *Global and Planetary Change*, 127, 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.012>
- Srinivasan, V., Seto, K. C., Emerson, R., & Gorelick, S. M. (2013). The impact of urbanization on water vulnerability: A coupled human-environment system approach for Chennai, India. *Global Environmental Change*, 23(1), 229–239. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.10.002>
- Switanek, M. B., Troch, P. A., Castro, C. L., Leuprecht, A., Chang, H.-I., Mukherjee, R., & Demaria, E. M. C. (2017). Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 2649–2666. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2649-2017>
- Tan, M. L., Gassman, P. W., Yang, X., & Haywood, J. (2020). A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes. *Advances in Water Resources*, 143, 103662. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2020.103662>
- Tatli, H., Dalfes, H. N., & Menteş, Ş. S. (2004). A statistical downscaling method for monthly total precipitation over Turkey. *International Journal of Climatology*, 24(2), 161–180. <https://doi.org/10.1002/joc.997>
- Tavakol-Davani, H., Nasser, M., & Zahraie, B. (2013). Improved statistical downscaling of daily precipitation using SDSM platform and data-mining methods. *International Journal of Climatology*, 33(11), 2561–2578. <https://doi.org/10.1002/joc.3611>
- Themessl, M. J., Gobiet, A., & Heinrich, G. (2012). Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Climatic Change*, 112(2), 449–468. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0224-4>

- Troin, M., Velázquez, J. A., Caya, D., & Brissette, F. (2015). Comparing statistical post-processing of regional and global climate scenarios for hydrological impacts assessment: A case study of two Canadian catchments. *Journal of Hydrology*, 520, 268–288. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.047>
- Tuel, A., & Eltahir, E. A. B. (2020). Why is the Mediterranean a climate change hot spot? *Journal of Climate*, 33(14), 5829–5843. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0910.1>
- Türkeş, M. (2008). Küresel iklim değişikliği nedir ? Temel kavramlar, nedenleri, gözlenen be öngörülen değişiklikler. *Küresel İklim Değişikliği ve Çevre*, 1(1), 26–37.
- Türkeş, M., Koç, T., & Sariş, F. (2009). Spatiotemporal variability of precipitation total series over Turkey. *International Journal of Climatology*, 29(8), 1056–1074. <https://doi.org/10.1002/joc.1768>
- Turkes, M., Turp, M. T., An, N., Ozturk, T., & Kurnaz, M. L. (2020). Impacts of Climate Change on Precipitation Climatology and Variability in Turkey. N. B. Harmancioglu & D. Altinbilek (Ed.), *Water Resources of Turkey* içinde (ss. 467–491). https://doi.org/10.1007/978-3-030-11729-0_14
- Unal, Y. S., Deniz, A., Toros, H., & Incecik, S. (2012). Temporal and spatial patterns of precipitation variability for annual, wet, and dry seasons in Turkey. *International Journal of Climatology*, 32(3), 392–405. <https://doi.org/10.1002/joc.2274>
- URL-1. (2023, Haziran 5). Türkiye Geneli Yıllık Alansal Yağışları: <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/yillik-toplam-yagis-verileri.aspx>. adresinden alınmıştır.
- URL-2. (2024, Şubat 13). Elaboration of an International Convention to Combat Desertification in Countries experiencing Serious Drought and/or Desertification, particularly in Africa. Environmental Policy and Law (C. 24): HeinOnline:<https://heinonline.org/HOL/LandingPage?handle=hein.journals/envpola24&div=20&id=&page=> adresinden alınmıştır.
- URL-3. (2023, Kasım 22). Reports of Severe Drought Events: <https://edo.jrc.ec.europa.eu/gdo/php/index.php?id=2050> adresinden alınmıştır.
- URL-4. (2023, Haziran 5). 2022 Faaliyet Raporu: <https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/Sayfa/759/1107/DosyaGaleri/dsi2022faaliyetraporu.pdf> adresinden alınmıştır.
- URL-5 (2023, Haziran 5). Toprak Su Kaynakları: <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/754#:~:text=Ülkemizde kişi başına düşen kullanılabilir,> yaşayan ülkeler arasında yer almaktadır adresinden alınmıştır.
- URL-6 (2024, Şubat 13). Driving harmonization of water-related terminology discussion paper: <https://ceowatermandate.org/wp-content/uploads/2019/11/terminology.pdf> adresinden alınmıştır.

- URL-7 (2024, Şubat 27). Global environment outlook 3: past, present and future perspectives (GEO-3): <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8609> adresinden alınmıştır.
- URL-8 (2024, Şubat 13) Water Security & the Global Water Agenda - A UN-Water Analytical Brief: <https://collections.unu.edu/eserv/UNU:2651/Water-Security-and-the-Global-Water-Agenda.pdf> adresinden alınmıştır.
- URL-9 (2024, Şubat 13). Yeni Senaryolar ile Türkiye İklim Projeksiyonları ve İklim Değişikliği: <https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/iklim-degisikligi-projeksiyon2015.pdf> adresinden alınmıştır.
- URL-10 (2023, Haziran 7). Climate variability: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/how-climate-works/climate-variability> adresinden alınmıştır.
- URL-11 (2024, Şubat 8). Susurluk Havzası Taşkın Yönetim Planı: http://taskinyonetimi.tarimorman.gov.tr/_engine/_engine/file.axd?file=/Dokumanlar/Havzalar/Susurluk/Susurluk_Taşkın_Yönetim_Planı.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-12 (2023, Ekim 28). Ramsar Sites Information Service: <https://www.ramsar.org/wetland/turkey> adresinden alınmıştır.
- URL-13 (2024, Şubat 8). Susurluk Nehir Havzası Yönetim Planı: https://www.tarimorman.gov.tr/SYGM/Belgeler/NHYP_DENİZ/SUSURLUK_NEHİR_HAVZASI_YÖNETİM_PLANI.pdf adresinden alınmıştır.
- URL-14 (2020, Aralık 21). DSİ 2019 Yılı Resmi Su Kaynakları İstatistikleri: <https://dsi.gov.tr/> adresinden alınmıştır.
- URL-15 (2021, Ekim 28). Mineral Research and Exploration General Directorate: <http://www.mta.gov.tr/eng/> adresinden alınmıştır.
- URL-16 (2021, Mart 2021). Best subsets regression, adjusted R-Sq, Mallows Cp: <https://online.stat.psu.edu/stat462/node/197/> adresinden alınmıştır.
- URL-17 (2023, Temmuz 13). Akım Gözlem Yıllıkları: <https://www.dsi.gov.tr/Sayfa/Detay/744> adresinden alınmıştır.
- URL-18 (2023, Eylül 5). CORINE Land Cover 2000 (vector/raster 100 m), Europe, 6-yearly: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2000?tab=metadata> adresinden alınmıştır.
- Veettil, A. V., & Mishra, A. K. (2016). Water security assessment using blue and green water footprint concepts. *Journal of Hydrology*, 542, 589–602. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.032>
- Veettil, A. V., & Mishra, A. K. (2018). Potential influence of climate and anthropogenic variables on water security using blue and green water scarcity, Falkenmark index, and freshwater provision indicator. *Journal of Environmental Management*, 228(September), 346–362. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.012>

- Veettil, A. V., Mishra, A. K., & Green, T. R. (2022). Explaining water security indicators using hydrologic and agricultural systems models. *Journal of Hydrology*, 607, 127463. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127463>
- Vörösmarty, C. J., Leveque, C., & Revenga, C. (2005). Fresh water. R. Hassan (Ed.), *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends* içinde (ss. 165–207). Washington: Island Press.
- Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., ... Davies, P. M. (2010). Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature*, 467(7315), 555–561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>
- Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., ... & Wiberg, D. (2016). Modeling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WfS) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development*, 9(1), 175–222. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-175-2016>
- Wang, B., Zheng, L., Liu, D. L., Ji, F., Clark, A., & Yu, Q. (2018). Using multi-model ensembles of CMIP5 global climate models to reproduce observed monthly rainfall and temperature with machine learning methods in Australia. *International Journal of Climatology*, 38(13), 4891–4902. <https://doi.org/10.1002/joc.5705>
- Wang, J., Guan, Y., Wu, L., Guan, X., Cai, W., Huang, J., ... Zhang, B. (2021). Changing Lengths of the Four Seasons by Global Warming. *Geophysical Research Letters*, 48(6). <https://doi.org/10.1029/2020GL091753>
- Wang, J., Guan, Y., Wu, L., Guan, X., Cai, W., Huang, J., ... & Zhang, B. (2021). Changing lengths of the four seasons by global warming. *Geophysical Research Letters*, 48(6), e2020GL091753. <https://doi.org/10.1029/2020GL091753>
- Warszawski, L., Frieler, K., Huber, V., Piontek, F., Serdeczny, O., & Schewe, J. (2014). The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3228–3232. <https://doi.org/10.1073/pnas.1312330110>
- Wilby, R. L., Charles, S. P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., & Mearns, L. O. (2004). Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. 12 Aralık 2021 tarihinde http://www.ctn.etsmtl.ca/cours/mgc921/dgm_no2_v1_09_2004.pdf adresinden erişildi.
- Wilby, R. L., Dawson, C. W., & Barrow, E. M. (2002). SDSM - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling and Software*, 17(2), 145–157. [https://doi.org/10.1016/s1364-8152\(01\)00060-3](https://doi.org/10.1016/s1364-8152(01)00060-3)
- Wilby, R. L., & Wigley, T. M. L. (2000). Precipitation predictors for downscaling: observed and general circulation model relationships. *International Journal of Climatology*, 20(6), 641–661. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(200005\)20:6<641::AID-JOC501>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(200005)20:6<641::AID-JOC501>3.0.CO;2-1)

- Wilby, R. L., Wigley, T. M. L., Conway, D., Jones, P. D., Hewitson, B. C., Main, J., & Wilks, D. S. (1998). Statistical downscaling of general circulation model output: A comparison of methods. *Water Resources Research*, 34(11), 2995–3008. <https://doi.org/10.1029/98WR02577>
- Wilcoxon, F. (1945). Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics. Bulletin.*, 1(6), 80–83.
- Wilhite, D. A. (1992). Preparing for drought: a guidebook for developing countries/prepared by Donald A. Wilhite.
- Wu, J., Deng, G., Zhou, D., Zhu, X., Ma, J., Cen, G., ... Zhang, J. (2021). Effects of climate change and land-use changes on spatiotemporal distributions of blue water and green water in Ningxia, Northwest China. *Journal of Arid Land*, 13(7), 674–687. <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0074-5>
- Wu, L., Li, C. bin, Xie, X. hong, Lv, J. nan, Wei, J. mei, Zhou, X., & Yang, L. shan. (2021). Future variation in mountainous discharge in arid northwestern China: A basin case study. *Journal of Mountain Science*, 18(9), 2287–2303. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6498-0>
- Xavier, A. C. F., Martins, L. L., Rudke, A. P., Morais, M. V. B., Martins, J. A., & Blain, G. C. (2022). Evaluation of Quantile Delta Mapping as a bias-correction method in maximum rainfall dataset from downscaled models in São Paulo state (Brazil). *International Journal of Climatology*, 42(1), 175–190. <https://doi.org/10.1002/joc.7238>
- Xie, P., Zhuo, L., Yang, X., Huang, H., Gao, X., & Wu, P. (2020). Spatial-temporal variations in blue and green water resources, water footprints and water scarcities in a large river basin: A case for the Yellow River basin. *Journal of Hydrology*, 590, 125222. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125222>
- Yang, C., Wang, N., Wang, S., & Zhou, L. (2018). Performance comparison of three predictor selection methods for statistical downscaling of daily precipitation. *Theoretical and Applied Climatology*, 131(1–2), 43–54. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1956-x>
- Yilmaz, M. (2023). Accuracy assessment of temperature trends from ERA5 and ERA5-Land. *Science of the Total Environment*, 856, 159182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159182>
- Zambrano-Bigiarini, M. (2020). hydroGOF: Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.3707013>
- Zeitoun, M. (2011). The global web of national water security. *Global Policy*, 2(3), 286–296. <https://doi.org/10.1111/j.1758-5899.2011.00097.x>
- Zhang, M., Xu, W., Hu, Z., Merz, C., Ma, M., Wei, J., ... & Gao, L. (2022). Projection of future climate change in the Poyang Lake Basin of China under the global warming of

1.5-3°C. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 985145.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.985145>

Zhang, W., & Goh, A. T. C. (2016). Multivariate adaptive regression splines and neural network models for prediction of pile drivability. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 45–52.
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.10.003>

Zhao, F., Wu, Y., Qiu, L., Sun, Y., Sun, L., Li, Q., ... Wang, G. (2018). Parameter Uncertainty Analysis of the SWAT Model in a Mountain-Loess Transitional Watershed on the Chinese Loess Plateau. *Water*, 10(6), 690.
<https://doi.org/10.3390/w10060690>

Zhao, X., Huang, G., Li, Y., Lin, Q., Jin, J., Lu, C., & Guo, J. (2021). Projections of meteorological drought based on CMIP6 multi-model ensemble: A case study of Henan Province, China. *Journal of Contaminant Hydrology*, 243, 103887.
<https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103887>

ÖZGEÇMİŞ

Murat ŞAN, 2009 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine başlamış ve 2013 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl başladığı Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'ndaki yüksek lisans öğrenimini 2016 yılında tamamlamıştır. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda başladığı doktora öğrenimine halen devam etmektedir. ŞAN 2014 yılından itibaren Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri İnşaat Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. İngilizce bilmekte olup evli ve bir çocuk babasıdır.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen SCIE yayınlar:

Şan, M., Nacar, S., Kankal, M., & Bayram, A. (2024). Spatiotemporal analysis of transition probabilities of wet and dry days under SSPs scenarios in the semi-arid Susurluk Basin, Türkiye. *Science of the Total Environment*, 912, 168641. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168641>

Şan, M., Nacar, S., Kankal, M., & Bayram, A. (2023). Daily precipitation performances of regression-based statistical downscaling models in a basin with mountain and semi-arid climates. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37(4), 1431–1455. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02345-5>

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen ulusal ve uluslararası bildiriler:

Şan, M., Nacar, S., Kankal, M., & Bayram, A. (2023). High and low group and monotonic trends of monthly precipitation in the near future (2030-2059) for Bursa province, Türkiye, under the SSP5-8.5 scenario. *3rd International Civil Engineering and Architecture Conference (ICEARC'23) Bildiriler Kitabı* s. 597–605. Trabzon.

Şan, M., Nacar, S., Kankal, M., & Bayram, A. (2023). Sosyoekonomik senaryolar altında Bursa ilinin aylık toplam yağış projeksiyonları. *HİDRO'2023: Ulusal Hidrojeoloji ve Su Kaynakları Sempozyumu. Bildiriler Kitabı* s. 29–36. Trabzon.

Şan, M., Nacar, S., Kankal, M., & Bayram, A. (2022). Susurluk havzası günlük yağış değerlerinin tahmini için bir istatistiksel ölçek indirgeme uygulaması. *11. Ulusal Hidrojeoloji Kongresi Bildiriler Kitabı* s. 347–358. Gaziantep.