

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MUDURNU ÇAYI HAVZASINDA SWAT MODELİ UYGULAMASI
VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdulkadir BAYCAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik Bilim Dalı

TEMMUZ 2023

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MUDURNU ÇAYI HAVZASINDA SWAT MODELİ UYGULAMASI VE İKLİM
DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Abdulkadir BAYCAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Osman SÖNMEZ

TEMMUZ 2023

Abdulkadir BAYCAN tarafından hazırlanan “MUDURNU ÇAYI HAVZASINDA SWAT MODELİ UYGULAMASI VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ” adlı tez çalışması 14.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı **Hidrolik** Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Doç. Dr. Osman SÖNMEZ (Danışman) Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Emrah DOĞAN Sakarya Üniversitesi	
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. İsmail DABANLI İstanbul Teknik Üniversitesi	



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “MUDURNU ÇAYI HAVZASINDA SWAT MODELİ UYGULAMASI VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../20.....).

Abdulkadir BAYCAN





Eşime ve çocuklarıma..



TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen ve her zaman yol gösteren değerli danışman hocam Doç. Dr. Osman SÖNMEZ’e, bilgi ve desteklerinden faydalandığım Arş. Gör. Gamze TUNCER’e teşekkürlerimi sunarım.

Abdulkadir BAYCAN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xvii
TABLO LİSTESİ	xix
ŞEKİL LİSTESİ	xxi
ÖZET	xxv
SUMMARY	xxvii
1. GİRİŞ	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	5
3. YÖNTEM VE UYGULAMA	7
3.1. SWAT Hidrolojik Modeli	7
3.1.1. SWAT modeli tarihsel gelişimi	7
3.1.2. SWAT modeli çalışma prensibi	9
3.1.2.1. Hidrolojik döngü	9
3.1.2.2. Yüzey akışı	9
3.1.2.3. Pik akım	12
3.1.2.4. Evapotranspirasyon	13
3.2. SWAT Model Kurulumu	15
3.2.1. Çalışma alanı	15
3.2.2. Model girdi verileri	16
3.2.2.1. Sayısal yükseklik modeli (DEM)	16
3.2.2.2. Arazi kullanımı ve örtüsü haritası (LULC)	18
3.2.2.3. Toprak haritası	19
3.2.2.4. Meteorolojik veriler	20
3.2.2.5. Akım gözlem verileri	23
3.3. Model Kalibrasyonu ve Validasyonu	25
3.3.1. SWAT-CUP	25
3.3.2. SUFI-2 algoritması ve belirsizlik analizi	26
3.3.3. Parametre hassasiyet analizi	28
3.3.4. Model performans ölçütleri	28
3.3.4.1. Determinasyon katsayısı (R^2)	28
3.3.4.2. Nash-sutcliffe verimliliği (NSE)	29
3.3.4.3. Yanlılık yüzdesi (PBIAS)	29
3.3.4.4. Kök ortalama kare hatasının (RMSE) gözlem verilerinin standart sapmasına oranı (RSR)	30
3.4. İklim Değişikliği Modeli ve Senaryoları	30
3.4.1. CMIP5 ve CORDEX platformları	32
3.4.2. EC-Earth2 modeli	34
3.4.3. Yanlılık (bias) düzeltme yöntemleri	36

3.4.3.1. Yağış ve sıcaklık doğrusal ölçeklendirmesi (LS).....	37
3.4.3.2. Yağış yerel yoğunluk ölçeklendirmesi (LOCI)	38
3.4.3.3. Yağış güç dönüşümü (PT).....	39
3.4.3.4. Sıcaklık varyans ölçeklendirmesi (VS)	40
3.4.3.5. Yağış ve sıcaklık dağılım haritalaması (DM)	41
4. SONUÇLAR	43
4.1. Model Kalibrasyon ve Validasyon Sonuçları.....	43
4.2. EC-Earth2 İklim Modeli Verileri ve Yanlılık (Bias) Düzeltme Sonuçları.....	51
4.3. EC-Earth2 İklim Modeli Meteorolojik Sonuçları.....	56
4.3.1. Sakarya bölgesi meteorolojik sonuçları	57
4.3.2. Mudurnu bölgesi meteorolojik sonuçları	68
4.4. EC-Earth2 İklim Modeli Hidrolojik Sonuçları.....	79
5. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER.....	93
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ	105



KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AGİ	: Akım Gözlem İstasyonu
ALOS-PALSAR	: Advanced Land Observation Satellite - Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar
AR5	: IPCC Fifth Assessment Report
AR6	: IPCC Sixth Assessment Report
ASF	: Alaska Satellite Facility
C-FARM	: Carbon Farming Alliance for Research and Management
CN	: Curve Number
CMIP	: Coupled Model Intercomparison Project
CMIP3	: Coupled Model Intercomparison Project Phase 3
CMIP5	: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CORDEX	: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
CREAMS	: Chemicals, Runoff and Erosion From Agricultural Management Systems
CV	: Coefficient of Variation
DEM	: Digital Elevation Model
DM	: Distribution Mapping
EC-EARTH	: A European community Earth System Model
ECMWF	: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
EPIC	: The Erosion Productivity Impact Calculator
ESA	: European Space Agency
FACT	: Fast Automated Calibration Tool
FAO	: Food and Agriculture Organization
GCM	: General Circulation Models
GLEAMS	: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems
GLUE	: Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
HEC-HMS	: Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
HES	: Hidroelektrik Santrali

HRU	: Hydrologic Response Units
IDF	: Intensity-Duration-Frequency
IFS	: Integrated Forecasting System
IPCC	: The Intergovernmental Panel on Climate Change
JAXA	: Japan Aerospace Exploration Agency
LS	: Linear Scaling
LOCI	: Precipitation Local Intensity Scaling
LULC	: Land Use and Land Cover
MCMC	: Markov Chain Monte Carlo
MĞİ	: Meteoroloji Gözlem İstasyonu
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
NHRCM	: Non-Hydrostatic Regional Climate Model
NSE	: Nash-Sutcliffe Efficiency
UNESCO	: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
PARASOL	: Parameter Solution
PBIAS	: Percent Bias
PSO	: Particle Swarm Optimization
PT	: Power Transformation of Precipitation
QUAL2E	: The Enhanced Stream Water Quality Models
RCA	: Rossby Centre Regional Atmospheric Model
RCM	: Regional Climate Model
RCP	: Representative Concentration Pathway
RMSE	: Root Mean Square Error
ROTO	: Routing Outputs to the Outlet
RSR	: RMSE-Observations Standard Deviation Ratio
SBB	: Silindirle Sıkıştırılmış Beton Baraj
SCS	: Soil Conservation Service
SMHI	: Swedish Meteorological and Hydrological Institute
SUFI-2	: Sequential Uncertainty Fitting
SYGM	: Su Yönetimi Genel Müdürlüğü
SWAT	: Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	: SWAT Calibration and Uncertainty Programs
SWRRB	: Simulator for Water Resources in Rural Basins
UNEP	: United Nations Environment Programme

USDA	: United States Department of Agriculture
VS	: Variance Scaling of Temperature
WCRP	: World Climate Research Programme
WEAP	: Water Evaluation And Planning System
WMO	: World Meteorological Organization
95PPU	: %95 Prediction Uncertainty





SİMGELER

a	: Ay
°C	: Santigrat derece
E_a	: Evapotranspirasyon miktarı [mm]
E_o	: Potansiyel evapotranspirasyon [mm/gün]
F	: Fiili tutulma
H₀	: Dünya dışı radyasyon [MJ/m ² gün]
(g)	: Günlük veriler
I_a	: İlk tutulma
i	: Yağış şiddeti
i_{wet}	: Yağışlı günler yağış yoğunluğu
P	: Potansiyel maksimum akış
P	: Yağış [mm]
P*	: Yağış son düzeltme adımı
P*¹	: Yağış ara adımı
P^b	: Düzeltilmiş günlük RCM yağışı [mm]
P_{gözlem}	: Gözlenen günlük yağış [mm]
P_{th,kontrol}	: Yağış eşiği [mm]
P_{r_{wet}}	: Yağışlı gün olasılığı
Q	: Fiili akış
Q_{gw}	: Geri dönüş akışı miktarı [mm]
Q_m	: Gözlem verisi
$\bar{Q}_m$	: Gözlem verisi ortalaması
q_{pik}	: Pik akış oranı [m ³ /s]
Q_s	: Model sonucu
$\bar{Q}_s$	: Model sonucu ortalaması
Q_{yüzey}	: Yüzeysel akış miktarı [mm]
R²	: Determinasyon katsayısı
R_{gün}	: Yağış miktarı [mm]
R_{tc}	: Konsantrasyon süresi sırasında düşen yağmur miktarı [mm]
S	: Tutulma parametresi

S	: Yoğunluk ölçekleme faktörü
S'	: Potansiyel maksimum tutulma
STDEV_m	: Gözlem verisi standart sapması
SW_t	: Nihai toprak su içeriği [mm]
SW₀	: Başlangıç toprak su içeriği [mm]
T	: Sıcaklık [°C]
T*	: Sıcaklık son düzeltme adımı
T*¹	: Sıcaklık ara adımı
t	: Zaman [gün]
t_{kons}	: Konsantrasyon süresi
T_{av}	: İlgili gün için ortalama hava sıcaklığıdır [°C]
T_{mn}	: İlgili gün için minimum hava sıcaklığı [°C]
T_{mx}	: İlgili gün için maksimum hava sıcaklığı [°C]
W_{sızıntı}	: Topraktan vadoz zona giren su miktarı [mm]
X₁₀	: 10. yüzdellik dilim
X₉₀	: 90. yüzdellik dilim
α	: Gama dağılımı şekil parametresi
α_{tc}	: Konsantrasyon süresi sırasında meydana gelen günlük yağışın kesiri
α_{0.5}	: Yarım saatlik en yüksek şiddetli yağışta düşen günlük yağmur oranı
β	: Gama dağılımı ölçek parametresi
λ	: Gizli buharlaşma ısısı [MJ/kg]
μ	: Yağış ve sıcaklık ortalaması
μ	: Gauss dağılımı konum parametresi
σ	: Standart sapma
σ	: Gauss dağılımı ölçek parametre

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan verilerin tanımı ve çözünürlüğü.	16
Tablo 3.2. Arazi kullanımı ve örtüsü sınıfları, tanımları ve yüzdeleri.	18
Tablo 3.3. Toprak sınıfları, tanımları ve yüzdeleri.	19
Tablo 3.4. Çalışmada kullanılan MGİ veri bilgileri.	20
Tablo 3.5. Çalışmada kullanılan AGİ veri bilgileri.	23
Tablo 3.6. Modelde kullanılan baz akım değerleri.	24
Tablo 3.7. Hidrolojik modellerin aylık zaman diliminde önerilen istatistikler için genel performans derecelendirmeleri	30
Tablo 3.8. Çalışmada kullanılan iklim modeli bilgileri.	35
Tablo 4.1. TLAPS ve PLAPS kalibrasyon sonuçları.	43
Tablo 4.2. Kar erime parametreleri kalibrasyon sonuçları.	44
Tablo 4.3. Parametre hassasiyet analizi sonuçları.	45
Tablo 4.4. Parametre kalibrasyon değerleri.	46
Tablo 4.5. Model kalibrasyon performans sonuçları ve değerlendirme dereceleri. ...	50
Tablo 4.6. Model validasyon performans sonuçları ve değerlendirme dereceleri. ...	50
Tablo 4.7. Yanlılık (bias) düzeltme yöntemleri değerlendirme indisleri.	52
Tablo 4.8. EC-Earth2 modeli iklim verileri ham ve yanlılık (bias) düzeltmesi yapılmış yıllık toplam yağış sonuçları.	54
Tablo 4.9. EC-Earth2 modeli iklim verileri ham ve yanlılık (bias) düzeltmesi yapılmış aylık ortalama maksimum ve minimum sıcaklık sonuçları.	55
Tablo 4.10. Dokurcun AGİ ortalama aylık akımları ve değişimleri.	81
Tablo 4.11. Gebeş AGİ ortalama aylık akımları ve değişimleri.	82
Tablo 4.12. Yağbasan AGİ ortalama aylık akımları ve değişimleri.	82



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. SWAT modeli tarihsel gelişimi ve model eklentileri.	7
Şekil 3.2. SCS eğri numarası yönteminde yağış-akış ilişkisi.....	12
Şekil 3.3. Mudurnu Çayı Havzası konum haritası.	15
Şekil 3.4. Mudurnu Havzası sayısal yükseklik modeli.	17
Şekil 3.5. Akım ağları ve alt havzalar.	17
Şekil 3.6. Arazi örtüsü ve kullanımı haritası.....	18
Şekil 3.7. Toprak haritası.	19
Şekil 3.8. MGİ lokasyonları ve temsil ettiği alanlar.	21
Şekil 3.9. Sakarya MGİ 1970-1995 ve 1996-2020 periyotlarındaki yağış indislerinin karşılaştırılması.	22
Şekil 3.10. Sakarya MGİ 1970-1995 ve 1996-2020 periyotlarındaki sıcaklık indislerinin karşılaştırılması.	22
Şekil 3.11. Çalışmada kullanılan AGİ konumları ve alt havza alanları.....	23
Şekil 3.12. Gebeş AGİ ile Dokurcun AGİ arasındaki korelasyon grafiği.	24
Şekil 3.13. SWAT-CUP programı çalışma düzeni ve optimizasyon algoritmaları. ..	25
Şekil 3.14. Parametre belirsizliği ile model tahmini belirsizliği arasındaki ilişkiyi gösteren şekil.....	27
Şekil 3.15. Temsili Konsantrasyon Rotaları (RCP) CO ₂ konsantrasyon değerleri.....	32
Şekil 3.16. EURO-CORDEX model kapsam alanı.....	34
Şekil 3.17. EC-Earth2 iklim modeli veri istasyon ağı ve seçilen istasyonlar.	36
Şekil 4.1. Dokurcun AGİ için a) 1981-1995 periyodu model ön sonuçları, b) 1981-1990 periyodu model kalibrasyon sonucu, c) 1991-1995 periyodu model validasyon sonucu.	46
Şekil 4.2. Gebeş AGİ için a) 1981-1995 periyodu model ön sonuçları, b) 1981-1990 periyodu model kalibrasyon sonucu, c) 1991-1995 periyodu model validasyon sonucu.	47
Şekil 4.3. Yağbasan AGİ için a) 1981-1995 periyodu model ön sonuçları, b) 1981-1990 periyodu model kalibrasyon sonucu, c) 1991-1995 periyodu model validasyon sonucu.	48
Şekil 4.4. Sakarya MGİ yağış verisi için yanlılık (bias) düzeltme yöntemlerine göre iklim indisleri grafikleri.	52
Şekil 4.5. Sakarya MGİ maksimum ve minimum sıcaklık verileri için yanlılık (bias) düzeltme yöntemlerine göre iklim indisleri grafikleri.	53
Şekil 4.6. Mudurnu MGİ yağış verisi için yanlılık (bias) düzeltme yöntemlerine göre iklim indisleri grafikleri.	53
Şekil 4.7. Mudurnu MGİ maksimum ve minimum sıcaklık verileri için yanlılık (bias) düzeltme yöntemlerine göre iklim indisleri grafikleri.	54
Şekil 4.8. EC-Earth2 İklim Modeli verilerine uygulanan yanlılık (bias) düzeltme çerçevesi.....	56
Şekil 4.9. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama aylık yağış grafiği.	57

Şekil 4.10. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama ilkbahar yağış grafiği.	58
Şekil 4.11. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama yaz yağış grafiği.	58
Şekil 4.12. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama sonbahar yağış grafiği.	59
Şekil 4.13. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama kış yağış grafiği.	59
Şekil 4.14. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) yıllık toplam yağış grafiği.	60
Şekil 4.15. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama aylık maksimum sıcaklık grafiği.	61
Şekil 4.16. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama aylık minimum sıcaklık grafiği.	61
Şekil 4.17. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama ilkbahar maksimum sıcaklık grafiği.	62
Şekil 4.18. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama yaz maksimum sıcaklık grafiği.	62
Şekil 4.19. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama sonbahar maksimum sıcaklık grafiği.	63
Şekil 4.20. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama kış maksimum sıcaklık grafiği.	63
Şekil 4.21. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama ilkbahar minimum sıcaklık grafiği.	64
Şekil 4.22. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama yaz minimum sıcaklık grafiği.	65
Şekil 4.23. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama sonbahar minimum sıcaklık grafiği.	65
Şekil 4.24. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama kış minimum sıcaklık grafiği.	66
Şekil 4.25. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama yıllık maksimum sıcaklık grafiği.	67

Şekil 4.26. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama yıllık minimum sıcaklık grafiği.	67
Şekil 4.27. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1970-1995) ortalama aylık yağış grafiği.	68
Şekil 4.28. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama ilkbahar yağış grafiği.	69
Şekil 4.29. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama yaz yağış grafiği.	69
Şekil 4.30. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama sonbahar yağış grafiği.	70
Şekil 4.31. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama kış yağış grafiği.	70
Şekil 4.32. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) yıllık toplam yağış grafiği.	71
Şekil 4.33. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1970-1995) ortalama aylık maksimum sıcaklık grafiği.	72
Şekil 4.34. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1970-1995) ortalama aylık minimum sıcaklık grafiği.	72
Şekil 4.35. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama ilkbahar maksimum sıcaklık grafiği.	73
Şekil 4.36. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama yaz maksimum sıcaklık grafiği.	73
Şekil 4.37. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama sonbahar maksimum sıcaklık grafiği.	74
Şekil 4.38. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama kış maksimum sıcaklık grafiği.	74
Şekil 4.39. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama ilkbahar minimum sıcaklık grafiği.	75
Şekil 4.40. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama yaz minimum sıcaklık grafiği.	76
Şekil 4.41. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama sonbahar minimum sıcaklık grafiği.	76
Şekil 4.42. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama kış minimum sıcaklık grafiği.	77

Şekil 4.43. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama yıllık maksimum sıcaklık grafiği.	78
Şekil 4.44. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama yıllık minimum sıcaklık grafiği.	78
Şekil 4.45. EC-Earth2 modeli, Dokurcun AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama aylık akım grafiği.	80
Şekil 4.46. EC-Earth2 modeli, Gebeş AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama aylık akım grafiği.	80
Şekil 4.47. EC-Earth2 modeli, Yağbasan AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama aylık akım grafiği.	81
Şekil 4.48. EC-Earth2 modeli, Dokurcun AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama ilkbahar akım grafiği.	83
Şekil 4.49. EC-Earth2 modeli, Dokurcun AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama yaz akım grafiği.	84
Şekil 4.50. EC-Earth2 modeli, Dokurcun AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama sonbahar akım grafiği.	84
Şekil 4.51. EC-Earth2 modeli, Dokurcun AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama kış akım grafiği.	85
Şekil 4.52. EC-Earth2 modeli, Gebeş AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama ilkbahar akım grafiği.	86
Şekil 4.53. EC-Earth2 modeli, Gebeş AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama yaz akım grafiği.	86
Şekil 4.54. EC-Earth2 modeli, Gebeş AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama sonbahar akım grafiği.	87
Şekil 4.55. EC-Earth2 modeli, Gebeş AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama kış akım grafiği.	87
Şekil 4.56. EC-Earth2 modeli, Yağbasan AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama ilkbahar akım grafiği.	88
Şekil 4.57. EC-Earth2 modeli, Yağbasan AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama yaz akım grafiği.	89
Şekil 4.58. EC-Earth2 modeli, Yağbasan AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama sonbahar akım grafiği.	89
Şekil 4.59. EC-Earth2 modeli, Yağbasan AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama kış akım grafiği.	90
Şekil 4.60. EC-Earth2 modeli, Dokurcun AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama yıllık akım grafiği.	91
Şekil 4.61. EC-Earth2 modeli, Gebeş AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama yıllık akım grafiği.	91
Şekil 4.62. EC-Earth2 modeli, Yağbasan AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama yıllık akım grafiği.	92

MUDURNU ÇAYI HAVZASINDA SWAT MODELİ UYGULAMASI VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

ÖZET

İklim değışikliği tüm dünyada hidrolojik döngü ve insani yaşam kaynakları üzerinde menfi ve müspet etkileri olan aşırı hidrolojik olaylara neden olmaktadır. Küresel ısınmadaki artış eğilimi, tüm dünyada yağış miktarını etkileyecek olan yüzey suyunun ve toprak neminin buharlaşma hızını maksimuma çıkartmaktadır. Hidrolojik döngüdeki bu tür değışiklikler, hem yüzey hem de yer altı suyunun akışını ve mevcudiyetini ve nihayetinde de nehir akışını etkileyecektir. Bu çalışma kapsamında, Sakarya, Düzce ve Bolu illerinde yer alan Mudurnu Çayı Havzası'nda SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hidrolojik modeli ile analiz yapılarak havzadaki iklim değışikliği etkileri değerdendirilmiştir. Hidrolojik model sonuçları ile gözlem verilerinin uyumluluğunu arttırarak güvenilir sonuçlar elde etmek için SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs) programı SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) algoritması ile kalibrasyon ve validasyon işlemi yapılmıştır. Model performans kriteri olarak Determinasyon Katsayısı (R^2), Nash-Sutcliffe Verimliliği (NSE), Yanlılık Yüzdesi (PBIAS), Kök Ortalama Kare Hatasının Gözlem Verilerinin Standart Sapmasına Oranı (RSR), p-faktörü ve r-faktörü kullanılmıştır. Havzada bulunan üç adet AGİ'ye göre yapılan kalibrasyon işlemi sonucu performans skor ve dereceleri olarak Dokurcun AGİ için; $R^2=0.87$, $NSE=0.87$, $PBIAS=3.7$, $RSR=0.37$ ve "çok iyi", Gebeş AGİ için; $R^2=0.91$, $NSE=0.91$, $PBIAS=-4.0$, $RSR=0.30$ ve "çok iyi", Yağbasan AGİ için; $R^2=0.80$, $NSE=0.80$, $PBIAS=-2.5$, $RSR=0.45$ "iyi" ve "çok iyi" sonuçları elde edilmiştir. Validasyon işlemi sonucunda ise Dokurcun AGİ için; $R^2=0.80$, $NSE=0.78$, $PBIAS=-7.8$, $RSR=0.47$ "iyi" ve "çok iyi", Gebeş AGİ için; $R^2=0.87$, $NSE=0.87$, $PBIAS=-3.6$, $RSR=0.36$ ve "çok iyi", Yağbasan AGİ için; $R^2=0.72$, $NSE=0.71$, $PBIAS=-11.8$, $RSR=0.54$ "tatmin edici" ve "iyi" sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında Mudurnu Çayı Havzası için oldukça başarılı bir hidrolojik model kurulmuştur. Oluşturulan bu hidrolojik model, havzada iklim değışikliğinin etkilerini analiz etmek amacıyla kullanılmıştır.

İklim modeli olarak CMIP5 kapsamındaki EC-Earth2 iklim modelinin RCA4 bölgesel iklim modeli kullanılarak ölçęği küçültölmüş 2021-2100 periyodu için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları verileri EURO-CORDEX projesinden temin edilerek kullanılmıştır. İklim modeli verileri yağış için dört yöntem, sıcaklık için üç yöntem kullanılarak yanlılıklardan (bias) arındırılmak için düzeltme işlemine tabi tutulmuştur. Bu yöntemlerden hangisinin daha iyi sonuçlar verdiğini analiz etmek amacıyla yağış için 6 adet, sıcaklık için 4 adet iklim indisi kullanılmıştır. İklim indisleri için gözlem ve model verilerinin uyumluluğu incelenmiş ve en iyi sonucu veren yanlılık (bias) düzeltme yönteminin dağılım haritalaması (DM) olduğu tespit edilmiştir. Bu düzeltilmiş iklim verileri kullanılarak 2026-2100 periyodu RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları verileri aylık zaman diliminde aynı periyotta, mevsimsel ve yıllık zaman diliminde ise 2026-2060 ile 2061-2100 periyotlarında analiz edilmiştir. EC-Earth2 iklim modeli gelecek simölasyonunda meteorolojik parametreler açısından sonuçlar

incelendiğinde havzanın Sakarya bölgesi için; genel olarak Aralık-Nisan arası sulak dönemde yağışların arttığı, Temmuz-Eylül arası kurak dönemde ise yağışlarda azalma meydana geldiği görülmüştür. RCP8.5 senaryosunda bu artış ve azalışların daha fazla olduğu tespit edilmiştir. RCP4.5 senaryosunda yıllık toplam yağış miktarında 70 mm civarında artış olurken, RCP8.5 senaryosunda değişim olmamıştır. Mudurnu bölgesi sonuçları incelendiğinde; Sakarya bölgesine benzer şekilde genel olarak Aralık-Nisan arası sulak dönemde yağışların arttığı, Mayıs-Eylül arası kurak dönemde ise yağışlarda azalma meydana geldiği görülmüştür. RCP8.5 senaryosunda bu artış ve azalışların daha fazla olduğu tespit edilmiştir. RCP4.5 senaryosunda yıllık toplam yağış miktarında 50 mm civarında artış olurken, RCP8.5 senaryosunda 25 mm artış olmuştur. Sıcaklıklar açısından Sakarya bölgesi maksimum ve minimum sıcaklıklarında yılın tümünde düzenli ve belirgin bir artış olmaktadır. RCP4.5 senaryosunda ortalama yıllık maksimum sıcaklıkta yaklaşık 2 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3 °C artış görülmektedir. Yıllık ortalama minimum sıcaklıkta ise RCP4.5 senaryosunda 1,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 2,5 °C artış görülmektedir. Mudurnu bölgesi maksimum ve minimum sıcaklıklarında Sakarya bölgesine benzer şekilde yılın tümünde düzenli ve belirgin bir artış olmaktadır. RCP4.5 senaryosunda ortalama yıllık maksimum sıcaklıkta yaklaşık 2,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 4 °C artış görülmektedir. Yıllık ortalama minimum sıcaklıkta ise RCP4.5 senaryosunda 2,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3,5 °C artış görülmektedir. İklim değişikliğinin akarsu akımları üzerindeki etkisi açısından sonuçlar incelendiğinde; Aralık-Mart arası sulak dönemde Mudurnu Çayı ana kolu üzerinde bulunan Dokurcun AGİ için RCP4.5 senaryosunda %113 (10 m³/s), RCP8.5 senaryosunda %130 (11 m³/s), Gebeş AGİ için RCP4.5 senaryosunda %56 (12 m³/s), RCP8.5 senaryosunda %65 (15 m³/s) artış görülmektedir. Dinsiz Çayı üzerinde bulunan Yağbasan AGİ için Aralık-Mart arası sulak dönemde RCP4.5 ve RCP8.5 senaryosunda sırasıyla %9 (1 m³/s) ve %8 (1 m³/s) artış görülmektedir.

SWAT MODEL IMPLEMENTATION AND EVALUATION OF CLIMATE CHANGE EFFECTS IN THE MUDURNU RIVER BASIN

SUMMARY

Climate change causes extreme hydrological events that have negative and positive effects on the hydrological cycle and human life resources all over the world. The increasing trend in global warming maximizes the evaporation rate of surface water and soil moisture, which will affect the amount of precipitation all over the world. Such changes in the hydrological cycle will affect the flow and availability of both surface and groundwater, and ultimately river flow. Hydrological models are tools used to analyze data on water resources, plan and manage the use of water resources, develop water resource management policies, and assess their environmental impact. However, in order for the model to produce correct results, the parameters must be selected correctly and the model must be calibrated with the observed data. For the correct management of water resources and the assessment of the hydro-climatological effects of climate change, general circulation model (GCM) data can be applied to the basin models and results can be obtained in the future projection.

Within the scope of this study, the effects of climate change in the basin were evaluated by analyzing the Mudurnu Stream Basin in the provinces of Sakarya, Düzce and Bolu with the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hydrological model. The hydrological model of the basin was created by using the digital elevation model, land use and cover map, soil map, daily total precipitation, daily maximum temperature and daily minimum temperature data of Sakarya and Mudurnu meteorological observation stations. The model was operated in a monthly time step during the 1978-1995 period, the first three years of which were the warm-up period. In order to analyze the accuracy of the hydrological model results, the model results and the data of Dokurcun, Gebes and Yagbasan stream gauging stations in the basin were compared. In order to obtain reliable results by increasing the compatibility of the hydrological model results with the observation data, calibration and validation process was performed with the SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs) program SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) algorithm. While the calibration process was done for ten years in the 1981-1990 period, the validation process was done for five years in the 1991-1995 period. Coefficient of Determination (R^2), Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE), Percent Bias (PBIAS), Ratio of Root Mean Square Error to Standard Deviation of Observation Data (RSR), p-factor and r-factor were used as model performance criteria to analyze the calibration results and hence the performance of the hydrological model. As a result of the calibration process performed according to the three SGSs in the basin, performance scores and grades for Dokurcun SGS; $R^2=0.87$, $NSE=0.87$, $PBIAS=3.7$, $RSR=0.37$ and “very good” for Gebes SGS; $R^2=0.91$, $NSE=0.91$, $PBIAS=-4.0$, $RSR=0.30$ and “very good” for Yagbasan SGS; $R^2=0.80$, $NSE=0.80$, $PBIAS=-2.5$, $RSR=0.45$ “good” and “very good” results were obtained. As a result of the validation process, for Dokurcun SGS; $R^2=0.80$, $NSE=0.78$, $PBIAS=-7.8$, $RSR=0.47$ “good” and “very good”, for Gebes SGS; $R^2=0.87$, $NSE=0.87$, $PBIAS=-$

3.6, RSR=0.36 and “very good” for Yagbasan AGI; $R^2=0.72$, NSE=0.71, PBIAS=-11.8, RSR=0.54 “satisfactory” and “good” results were obtained. Considering these results, a very successful hydrological model has been established for the Mudurnu Stream Basin. This hydrological model was used to analyze the effects of climate change in the basin.

As the climate model, the data of the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios for the 2021-2100 period, which was scaled down by using the RCA4 regional climate model of the EC-Earth2 climate model within the scope of CMIP5, were obtained from the EURO-CORDEX project and used. For climate model precipitation data, four methods, linear scaling (LS), local intensity scaling (LI), power transformation (PT) and distribution mapping (DM) were applied, and for temperature data, linear scaling (LS), variance scaling (VS) and distribution mapping (DM) three methods were used to correct the biases. In order to analyze which of these methods gives better results, 6 climate indices, monthly mean, standart deviations, coefficient of variation, 90th percentile, probability of wet days and intensity of wet days, were used for precipitation data, and 4 climate indices, monthly mean, 10th percentile, 90th percentile, standart deviation were used for temperature data. The compatibility of the observation and model data for the climate indices was examined and it was determined that the bias correction method that gave the best results for both precipitation and temperature data in both Sakarya MOS and Mudurnu MOS data was distribution mapping (DM).

Using these adjusted climate data, the data of the 2026-2100 period RCP4.5 and RCP8.5 scenarios were analyzed in the same period in the monthly time frame, and in the 2026-2060 and 2061-2100 periods in the seasonal and annual timeframe. When the results in terms of meteorological parameters are examined in the EC-Earth2 climate model future simulation, for the Sakarya region of the basin; In general, it has been observed that precipitation increases in the wet period between December and April, and decreases in precipitation in the dry period between July and September. It has been determined that these increases and decreases are more in the RCP8.5 scenario. While there was an increase of around 70 mm in the annual total precipitation in the RCP4.5 scenario, there was no change in the RCP8.5 scenario. When the results of Mudurnu region are examined; similar to the Sakarya region, it was observed that precipitation increased in the wet period between December and April, and decreased in the dry period between May and September. It has been determined that these increases and decreases are more in the RCP8.5 scenario. While there was an increase of around 50 mm in the annual total precipitation in the RCP4.5 scenario, there was an increase of 25 mm in the RCP8.5 scenario. In terms of temperatures, there is a regular and significant increase in the maximum and minimum temperatures of the Sakarya region throughout the year. In the RCP4.5 scenario, an increase of approximately 2 °C is observed in the average annual maximum temperature, and approximately 3 °C in the RCP8.5 scenario. In the annual average minimum temperature, an increase of 1.5 °C is observed in the RCP4.5 scenario and approximately 2.5 °C in the RCP8.5 scenario. Similar to Sakarya region, there is a regular and significant increase in the maximum and minimum temperatures of the Mudurnu region throughout the year. In the RCP4.5 scenario, an increase of approximately 2.5 °C is observed in the average annual maximum temperature, and approximately 4 °C in the RCP8.5 scenario. In the annual average minimum temperature, an increase of 2.5 °C in the RCP4.5 scenario and approximately 3.5 °C in the RCP8.5 scenario is observed. When the results are examined in terms of the effect of climate change on stream flows; during the wet period between December and March, for Dokurcun SGS on the main tributary of

Mudurnu Stream, 113% (10 m³/s) in RCP4.5 scenario, 130% (11 m³/s) in RCP8.5 scenario, for Gebes SGS 56% (12 m³/s) in RCP4.5 scenario, 65% (15 m³/s) in RCP8.5 scenario increase is observed. For Yağbasan AGI located on Dinsiz Stream, an increase of 9% (1 m³/s) and 8% (1 m³/s) is observed in the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, respectively, in the wet period between December and March.



1. GİRİŞ

Hidrolojik modeller, su kaynaklarına ilişkin verileri analiz etmek, su kaynaklarının kullanımını planlamak ve yönetmek, su kaynakları yönetimi politikalarını geliştirmek ve çevresel etkilerini değerlendirmek için kullanılan araçlardır. Bu modellerden yaygın olarak kullanılanı ise USDA (Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı) tarafından geliştirilmiş SWAT (Soil and Water Assessment Tool) modelidir. Bu model yağış, sıcaklık, toprak özellikleri gibi farklı parametreleri kullanarak gerçek su kaynakları sistemlerinin davranışını tahmin etmektedir. Ancak, modelin doğru sonuçlar üretmesi için parametrelerin doğru seçilmesi ve modelin gözlemlenmiş veriler ile kalibre edilmesi gerekmektedir. Kalibrasyon işleminde gerçek akış verileriyle modelin ürettiği sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Eğer modelin sonuçları gözlemlenmiş verilere uymuyorsa, parametreler değiştirilmekte ve model yeniden çalıştırılmaktadır. Böylelikle model kalibrasyonu, modelin doğru sonuçlar üretmesini sağlayarak modelin güvenilirliğini arttırmakta ve daha az veri ile daha iyi sonuçlar elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu da karar vericilerin daha hızlı ve daha verimli kararlar almalarına yardımcı olmaktadır.

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli 1.5°C Küresel Isınma Raporu'na göre, iklim değişikliği tüm dünyada hidrolojik döngü ve insani yaşam kaynakları üzerinde menfi ve müspet etkileri olan aşırı hidrolojik olaylara neden olmaktadır (IPCC, 2018). Ayrıca iklim değişikliği, ekosistemde döngünün bozulmasında da önemli bir rol oynayarak küresel ısınmanın artmasına neden olmaktadır (Merz ve ark., 2014; Easterling ve ark., 2000; Joshi ve Dongol., 2018; Joshi ve ark., 2021). Antropojenik faktörlerin neden olduğu sera gazı (CO₂) emisyonları küresel ısınma oranını artırmaktadır. Sera gazı emisyonlarının oranı bugünkü oranda artmaya devam ederse, küresel ısınmanın 2052 yılına kadar 1,5 °C'den 2 °C'ye çıkacağı tahmin edilmektedir (IPCC, 2018). Küresel ısınmadaki artış eğilimi, tüm dünyada yağış miktarını etkileyecek olan yüzey suyunun ve toprak neminin buharlaşma hızını maksimuma çıkartmaktadır (Griffin ve ark., 2013; Ford ve ark., 2018). Hidrolojik döngüdeki bu tür değişiklikler, hem yüzey hem de yer altı suyunun akışını ve mevcudiyetini ve nihayetinde de nehir akışını etkileyecektir (Middlekoop ve ark., 2001). Ayrıca, bölgesel yağış eğilimi, açık deniz

ve okyanus akıntıları, rüzgar modellerinden etkilenecek bunun sonucunda da akarsu akışında değişikliğe neden olacaktır. Bu nedenle, literatürdeki bir çok çalışmada, su kaynaklarının doğru yönetimi için iklim değişikliğinin hidro-klimatolojik değişkenlerdeki etkisinin analiz edilmesi önerilmiştir (Joshi ve ark., 2020; Ngigi, 2009; Kalra ve ark., 2013).

İklim değişikliğinin hidro-klimatolojik değişkenler (yağış, sıcaklık, akarsu akışı v.b.) üzerindeki etkisini değerlendirmek için CMIP (Birleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi), Dünya İklim Araştırma Programı kapsamında 1995 yılında başlatılmıştır. CMIP, birleştirilmiş dinamik okyanus, kara yüzeyi ve termodinamik deniz buzu sirkülasyonlu atmosferik modelini kullanarak GCM'lerin (Genel Sirkülasyon Modeli) karşılaştırmasını sağlayan bir çerçevedir. GCM'ler, gelecekteki iklim değişikliği projeksiyonunun simülasyonu için birincil araçlardır. Bölgesel ve küresel iklimlerdeki potansiyel değişiklikleri anlamak için kaynaklar sağlamaktadır. Farklı çalışmalar, gelecekte farklı iklim parametrelerinin değişikliğini anlamak için çeşitli GCM'lerden iklim projeksiyonunun kullanılmasını önermektedir. Dolayısıyla GCM'lerin çıktıları, iklim değişikliğinin yarattığı etkinin değerlendirilmesinde kullanılabilecek en verimli yaklaşımdır. GCM'ler, düşük çözünürlüklü büyük ölçekli iklim projeksiyonu verileri olduğundan, verilerin çalışma alanı için bölgeselleştirilmeleri önerilmektedir. GCM'lerin iklim projeksiyonları, yanlılık (bias) olarak bilinen farklı sistematik hata ve belirsizlik faktörlerini içermektedir. Literatürdeki birçok çalışmada, gelecekteki aşırılıkların belirlenmesi için GCM'lerden tahmin edilen yağış ve sıcaklık parametreleri kullanılmaktadır. İklim değişikliği senaryoları için tahmin edilen yağış ve sıcaklık verileri çalışma alanının kurulmuş olan hidrolojik modeline girilerek iklim projeksiyonları için akarsu akımları elde edilmektedir. Pik debiler gibi belirlenmiş ekstremler, taşkın yayılım haritaları oluşturmak için hidrolik ve hidrolojik modellerde kullanılmaktadır. Hidrolojik modellerde model mekanizmalarının, algoritmaların, mekansal ve zamansal modelleme ölçeklerinin seçimi, sonuçları önemli ölçüde etkileyebilmekte ve model tahminlerinde bir başka önemli belirsizlik kaynağı oluşturmaktadır (You ve ark., 2021). Hidrolojik akış tahminlerindeki belirsizliklerin sistematik olarak nasıl değerlendirileceği, iklim değişikliğinin gelecekteki su kaynakları üzerindeki etkisini açıklamak için hayati önem taşımaktadır (Müller ve ark., 2021). SWAT, en yaygın kullanılan havza hidrolojik modellerinden biridir ve hidrolojik hesaplamaları, su döngüsünün kara yüzeyi bileşenini ve nehir bileşenini

içermektedir (Ali ve Söffker, 2018). Her hesaplama bileşeni genellikle iki veya daha fazla alternatif yöntem sağlasa da, hidrolojik süreçleri simüle etmek için SWAT kullanan çoğu çalışma (örneğin Chen ve ark. (2019)) bunlardan yalnızca birini kullanmakta ve bu bileşenlerin hesaplama yöntemlerinin simülasyon üzerindeki etkisini analiz etmektedir. Ölçüme dayanan verilerin desteği olmadan hangi yöntemin gerçek havza özelliklerini daha iyi yansıttığını belirlemek zordur (Jisha ve ark., 2018). Bununla birlikte, doğru verilerin elde edilmesi, küresel olarak uygulanmasını son derece zorlaştırmakta, yoğun emek ve maliyet gerektirmektedir. Bu nedenle, her bir bileşen için hesaplama yöntemi seçiminin SWAT simülasyon sonuçları üzerindeki etkisinin karşılaştırılması ve bileşenlerin belirsizliğinin değerlendirilmesi, yöntemlerin uygunluğunu ayırt etmek ve verimliliği artırmak için temel uygulama adımlarıdır. Elde edilecek çıktılar ise havzayı daha gerçekçi tahminler ile analiz etmek ve bu projeksiyonlar için olası taşkınların sonuçlarını aynı nispette ortaya koymaktadır. Hidrolojik ve hidrolik modellerdeki bilimsel ve teknolojik gelişmelerin yanı sıra, nehir havzalarının ölçeğine indirgenmiş iklim değişikliği senaryolarının mevcudiyeti ile gelecekteki taşkın olaylarının büyüklüğünü ve sıklığını simüle etme ve tahmin etme yeteneği son yıllarda önemli ölçüde iyileşmiştir (Knebl ve ark., 2005; Forte ve ark., 2006; Pradhan, 2009).

Bu sebeplerle çalışma sahası olarak belirlenmiş, Mudurnu Çayı Havzası için SWAT hidrolojik modeli kurulmuş, küresel iklim modeli ve senaryoları kullanılarak gelecek projeksiyonunda havzanın meteorolojik ve hidrolojik parametrelerindeki değişim analiz edilmiştir.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Akarsu havzalarında hidrolojik modelleme çalışmaları, bu amaçla geliştirilmiş olan çeşitli havza modelleme programları ile birlikte ülkemiz ve dünya literatüründe yaygın çalışma alanlarından biridir. Bu havza hidrolojik modellerinin altlık olarak kullanıldığı ve iklim modelleri vasıtasıyla havzada gelecekteki iklim değişikliği etkilerinin analizlerinin yapılmasını konu alan birçok çalışma yapılmıştır. Bu kapsamda ülkemizde SWAT modeli kullanılarak havzanın hidrolojik modelinin kurulduğu, elde edilen model akım verileri ile SWAT-CUP programında kalibrasyon ve validasyon işlemlerinin yapıldığı çeşitli çalışmalar yapılmıştır (Dilibaier, 2022; Özdemir, 2021; Peker, 2020; Askar, 2020; Saddiqi, 2019; Jouma, 2019; Cüceloğlu, 2019, Güngör, 2018). SWAT-CUP programında yer alan SUFI-2, GLUE, ParaSol ve PSO kalibrasyon algoritmaları ile yapılan kalibrasyon sonuçlarının incelendiği ve bunun sonucunda SUFI-2 algoritmasının en iyi sonucu verdiği görülmüştür (Dilibaier, 2022). Kalibrasyonda kullanılan veri olarak akarsu akımının yanında sediment ve azot yükleri gibi diğer parametreler ile kalibrasyonun yapıldığı çalışmalar da bulunmaktadır (Dilibaier, 2022; Özdemir, 2021). Bunun yanında HBV-Light ve HEC-HMS gibi diğer havza modelleme programları da kullanılmıştır (Mesta Yoleri, 2022). Küresel iklim modellerinden (GCM) daha hassas veriler elde etmek amacıyla bölgesel iklim modelleri (RCM) vasıtasıyla dinamik ölçek küçültme yaklaşımının kullanıldığı çalışmalar da bulunmaktadır (Mesta Yoleri, 2022; SYGM, 2016). Bununla birlikte bazı çalışmalarda MGM tarafından ülkemiz için hazırlanmış olan ölçeği küçültülmüş iklim modeli verileri kullanılmıştır (Dilibaier, 2022; Özdemir, 2021; Peker, 2020). Diğer bir ölçek küçültme yöntemi olan istatistiksel ölçek küçültme yöntemi de bazı çalışmalarda kullanılmıştır (Askar, 2020; Cüceloğlu, 2019). Hidrolojik model ve iklim modeli kullanılarak yapılan bu çalışmalar ile çalışma sahasında RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre çeşitli periyotlarda gelecek projeksiyonundaki iklim parametrelerinin analizi (Dilibaier (2022), Mesta Yoleri (2022), Askar (2020), Jouma (2019), Cüceloğlu (2019), SYGM (2016)), akarsu akımlarının değişimi (Dilibaier (2022), Mesta Yoleri (2022), Özdemir (2021), Peker (2020), Askar (2020), Saddiqi (2019), Jouma (2019), Cüceloğlu (2019), Güngör (2018), SYGM (2016)), kar erimesi

(Peker (2020)), sediment miktarı (Dilibaier (2022), Özdemir (2021)), su kalitesi (Dilibaier (2022)), havza ve rezervuar su bütçesi analizleri (Cüceloğlu (2019), SYGM (2016)) ve HES enerji üretimi (Mesta Yoleri (2022)) gibi çeşitli amaçlar için analizler yapılmıştır.

Bu çalışmada ise literatürde yaygın kullanılan SWAT modeli ile Mudurnu Çayı Havzası'nın hidrolojik modeli kurulmuştur. Kalibrasyonda doğruluğu kanıtlanmış SWAT-CUP programının en iyi sonuç veren algoritması SUFI-2 kullanılmıştır. Küresel iklim modelinin (GCM) bölgesel iklim modeli (RCM) ile dinamik olarak ölçeği küçültülmüş iklim modeli verileri EURO-CORDEX projesinden temin edilerek bu veriler yanlılık (bias) düzeltilmesine tabi tutulmuştur. Yanlılığı (bias) düzeltilmiş bu veriler kullanılarak havzada gelecek projeksiyonunda RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre iklim parametrelerindeki değişimlerin ve bu verilerin hidrolojik model ile çalıştırılmasıyla da akım verilerindeki değişimlerin elde edilmesine çalışılmıştır.

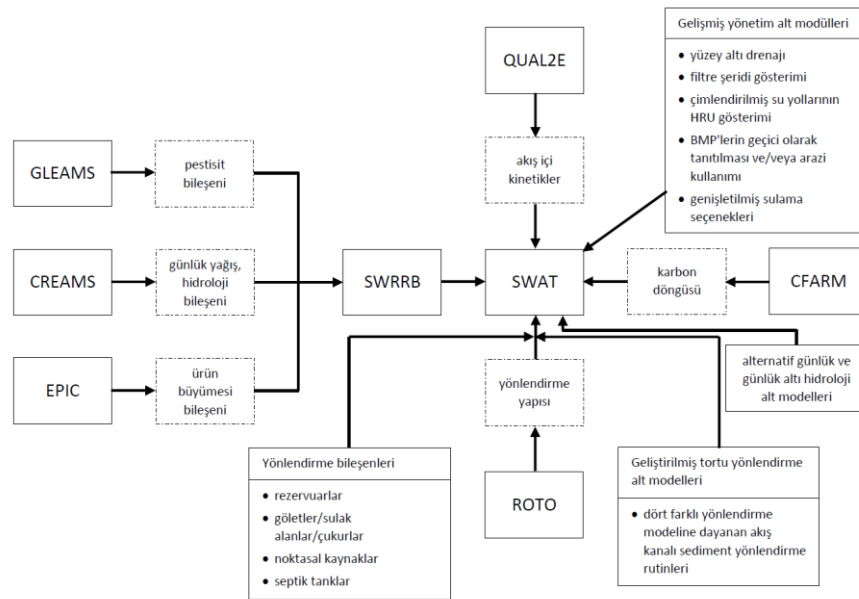
3. YÖNTEM VE UYGULAMA

3.1. SWAT Hidrolojik Modeli

Soil and Water Assessment Tool (Toprak ve Su Değerlendirme Aracı), su havzaları ve büyük nehir havzalarındaki su kaynakları ve noktasal olmayan kaynak kirliliği değerlendirmek amacıyla Amerika Birleşik Devletleri Tarım Bakanlığı tarafından geliştirilmiştir. Model havza ölçekli, kavramsal, fiziksel temelli ve sürekli zamanlı olup ana model bileşenleri olarak hava durumu, hidroloji, toprak sıcaklığı ve özellikleri, bitki büyümesi, nütrientler, pestisitler, bakteri ve patojenler ile arazi yönetimini içermektedir (Arnold ve ark., 1998; Gassman ve ark., 2007; Neitsch ve ark., 2011).

3.1.1. SWAT modeli tarihsel gelişimi

SWAT Modeli, Amerika Birleşik Devletleri'nin ilk ve en etkili çevre yasası olarak 1972 yılında çıkarılan Su Kirliliği Kontrolü Yasası (Clean Water Act) sonrasında su kirliliği ve havza modellemesi kapsamlarında geliştirilen birçok modelin birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. SWAT modelinin tarihsel gelişimi ve model eklentileri Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. SWAT modeli tarihsel gelişimi ve model eklentileri (Arnold ve ark., 2012).

Noktasal olmayan kirlilik yüklerinin tarla ölçeğinde simüle edilmesi için CREAMS (Chemicals, Runoff and Erosion From Agricultural Management Systems) modeli geliştirilmiştir (Knisel, 1980). Pestisit ve nütrientlerin yeraltı suyu yüklemelerine odaklanan noktasal olmayan bir kaynak modeli olan GLEAMS (Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems) (Leonard ve ark. (1987)) ve erozyonun mahsul verimliliği üzerindeki etkisini simüle eden EPIC (The Erosion Productivity Impact Calculator) (Williams ve ark. (1984)) modellerinin özelliklerinin, ABD genelinde ölçümlenmemiş kırsal havzalar için su ve sediment hareketi üzerindeki yönetim etkilerini simüle etmek üzere tasarlanmış olan SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Williams ve ark. (1985)) modeline dahil edilmesiyle SWAT'ın ilk öncülü ortaya çıkmıştır.

SWRRB, birkaç yüz kilometrekareye kadar olan su havzaları için kolaylıkla kullanılırken, birkaç bin kilometrekareyi aşan havzalarda akarsu akışını simüle etmek için incelenen havzanın birkaç yüz alt havzaya bölünmesi gerekmektedir. SWRRB'deki havza bölümü on alt havza ile sınırlı olup model alt havzalardan taşınan su ve sedimenti doğrudan havzası çıkışına yönlendirmektedir. Bu sınırlamalar nedeniyle birden fazla SWRRB çalışmasından çıktılarını kullanan ve akışları kanallar ve rezervuarlar boyunca yönlendiren ROTO (Routing Outputs to the Outlet) (Arnold ve ark. (1995)) modeli geliştirildi. ROTO birden fazla SWRRB çalışmasını birbirine bağlayarak alt havza sınırlamasının üstesinden gelmekle birlikte birden fazla SWRRB dosyasının modele giriş ve çıkış süreci uzun olmakta ve önemli ölçüde bilgisayar depolaması gerektirmektedir. Bunun üstesinden gelmek için SWRRB ve ROTO, tek bir model olan SWAT'ta birleştirilmiştir. SWAT, çok geniş alanların simülasyonlarına izin verirken SWRRB'yi değerli bir simülasyon modeli yapan tüm özelliklerini korumuştur (Gassman ve ark., 2007; Neitsch ve ark., 2011).

SWAT, 1990'ların başında oluşturulduğundan beri, QUAL2E (The Enhanced Stream Water Quality Models) (Brown ve Barnwell (1987)) modelinden su kalitesi için akış içi kinetik rutinleri, C-FARM (Carbon Farming Alliance for Research and Management) modeline (Kemanian ve ark. (2011)) dayalı geliştirilmiş bir karbon döngüsü rutini, Green-Ampt infiltrasyon yöntemini (Green ve Ampt (1911)) içeren alternatif günlük ve günlük altı hidroloji rutinleri ile rezervuar, gölet, sulak alan, nokta kaynağı, fosseptik etkileri, gelişmiş sediment yönlendirme rutinleri, yönetim

uygulaması ve arazi kullanımı değişikliklerinin zamansal muhasebesi vb. modifikasyonlar dahil edilmiştir (Arnold ve ark., 2010; Arnold ve ark., 2012).

3.1.2. SWAT modeli çalışma prensibi

SWAT modelinde bir su havzası birçok alt havzaya bölünmekte ve bunlar daha sonra homojen arazi kullanımı, toprak özellikleri ve eğimden oluşan hidrolojik işlem birimlerine (HRU) ayrılmaktadır. Genel hidrolojik denge, yağışın bitki örtüsü tarafından tutulması, yağışın bölümlülüğü, kar erimesi suyu, yüzey akışı ile sızma arasındaki sulama suyu, suyun toprak profile içerisinde yeniden dağılımı, evapotranspirasyon, topraktan yanal yüzeyaltı akışı ve sığ akiferlerden geri dönüş akışı olmak üzere her bir HRU için simüle edilmektedir (Gassman ve ark., 2007).

3.1.2.1. Hidrolojik döngü

SWAT tarafından simüle edilen hidrolojik döngü, su dengesi denkleminde dayanmakta olup denklem 3.1’de verilmiştir.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{gün} - Q_{yüzey} - E_a - W_{sızıntı} - Q_{gw}) \quad (3.1)$$

SW_t nihai toprak su içeriği (mm), SW_0 başlangıç toprak su içeriği (mm), t zaman (gün), $R_{gün}$ yağış miktarı (mm), $Q_{yüzey}$ yüzeysel akış miktarı (mm), E_a evapotranspirasyon miktarı (mm), $W_{sızıntı}$ topraktan vadoz zona giren su miktarı (mm) ve Q_{gw} geri dönüş akışı miktarı (mm)’dir (Neitsch ve ark., 2011).

Su dengesi, bitki büyümesini, tortuların, besinlerin, pestisitlerin ve patojenlerin hareketini etkilediği için SWAT’taki tüm süreçlerin arkasındaki itici güçtür. Havza hidroloji simülasyonu; her bir alt havzadaki ana kanala gelen su, sediment, nütrient ve pestisit yüklemelerinin miktarını kontrol eden arazi fazı ile su, sediment, vb., hareketinin havzanın kanal ağı üzerinden çıkışına doğru olan akış içi veya yönlendirme fazı olmak üzere iki kısımdır (Gassman ve ark., 2007).

3.1.2.2. Yüzey akışı

Yüzey akışı, toprak yüzeyine gelen yağmursuyunun hızı, sızma hızını aştığında meydana gelmektedir. Su başlangıçta kuru bir toprağa uygulandığında, sızma hızı genellikle çok yüksektir. Ancak toprak ıslandıkça sızma hızı azalmaktadır. Yağmursuyu hızı sızma hızından yüksek olduğunda yüzey çöküntüleri dolmaya

başlamaktadır. Tüm yüzey çöküntüleri dolduktan sonra gelen su hızı sızma hızından daha yüksek olmaya devam ederse, yüzey akışı başlamaktadır.

SWAT programında yüzey akışını tahmin etmek için SCS eğri numarası yöntemi (USDA SCS (1972)) ve Green & Ampt sızma yöntemi (Green ve Ampt (1911)) olmak üzere iki yöntem bulunmaktadır. Bu çalışmada SCS eğri yöntemi kullanılmıştır. SCS akış denklemi, 1950'lerde yaygın olarak kullanılmaya başlanan ampirik bir modeldir. Bu model, ABD genelindeki küçük kırsal havzalardan gelen yağış-akış ilişkilerini içeren 20 yıldan fazla bir çalışmanın sonucunda, değişen arazi kullanımı ve toprak türleri altında akış miktarlarını tahmin etmek için tutarlı bir temel sağlamak üzere geliştirilmiştir (Rallison ve Miller, 1981).

Bir havzaya düşen yağış için doğal yağış ve akış kayıtları incelendiğinde akışın bir miktar yağmur biriktikten sonra başladığı görülmektedir. Bu biriken yağmur ilk tutulma olarak tanımlanmakta ve yağış, akış ve tutulma (akışa dönüşmeyen yağmur) arasındaki ilişki denklem 3.2'deki gibi ifade edilmiştir.

$$\frac{F}{S'} = \frac{Q}{P} \quad (3.2)$$

Burada;

F : Fiili tutulma

S' : Potansiyel maksimum tutulma ($S' \geq F$)

Q : Fiili akış

P : Potansiyel maksimum akış ($P \geq Q$)

S' parametresi, ilk tutulmayı (I_a) içermez ve belirli bir yağış için sabittir. Bu değer yağışın sınırsız devam etmesi halinde mevcut koşullar altında meydana gelebilecek maksimum değerdir. F fiili tutulma herhangi bir andaki P ve Q arasındaki farktır ve değişkendir. Bu durumda ilk tutulmanın (I_a) gözardı edildiği bir yağış-akış ilişkisi denklem 3.3'deki gibi ifade edilmiştir.

$$Q = \frac{P^2}{P + S'} \quad (3.3)$$

İlk tutulma (I_a) yağıştan çıkarılmak suretiyle yağış-akış ilişkisine dahil edilmektedir. Bu durumda tutulma parametresi (S), S' ve I_a 'nın toplamından meydana gelmektedir. Böylelikle ilk tutulmanın (I_a) dikkate alındığı yağış-akış ilişkisi denklem 3.4'teki şekilde olmaktadır.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (3.4)$$

İlk tutulma (I_a), tamamı akış başlamadan önce meydana gelen, esasen engelleme, sızma ve yüzey depolamadan oluşmaktadır. Denklem 3.4'teki bu değişkenleri tahmin etme gerekliliğini ortadan kaldırmak için, I_a ve S arasındaki ilişki, deneysel küçük havzalarda yağış ve akış verileri aracılığıyla ampirik olarak geliştirilmiş olup denklem 3.5'teki gibidir.

$$I_a = 0.2 \times S \quad (3.5)$$

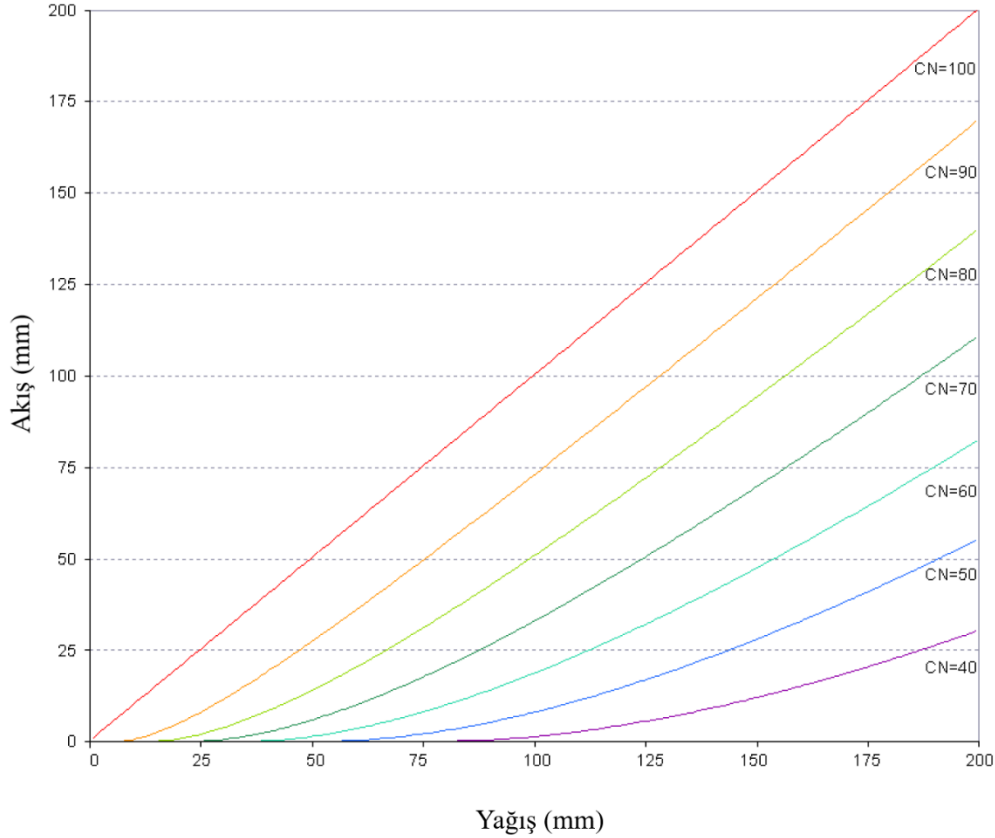
Böylelikle SCS eğri numarası yöntemi ile yağıştan doğrudan akışı belirlemek için denklem 3.6 kullanılmaktadır.

$$Q_{\text{yüzey}} = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (3.6)$$

Toplam tutulmanın (S) yüzde 20'si, akış başlamadan önce meydana gelen engelleme, sızma ve yüzey depolama olan ilk tutulma (I_a), geriye kalan yüzde 80 ise esas olarak akış başladıktan sonra meydana gelen sızmadır. Bu sızma, toprak yüzeyindeki sızma hızı, toprak profilindeki iletim hızı veya toprak profilinin su depolama kapasitesi sınırlayıcı faktörlerinden ilgili toprak profilinde belirleyici olan parametre tarafından kontrol edilmektedir. Tutma parametresi, toprak, arazi kullanımı, yönetimi ve eğimdeki değişikliklerden dolayı mekansal olarak ve toprağın su içeriğindeki değişikliklerden dolayı zamansal olarak değişmektedir. Tutma parametresi denklem 3.7'deki gibi tanımlanmıştır.

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3.7)$$

Burada CN, ilgili gündeeki eğri numarasıdır. SCS eğrisi numarası, toprağın geçirgenliğinin, arazi kullanımının ve önceki topraksuyu koşullarının bir fonksiyonudur. SCS eğri numarası yönteminin farklı eğri numarası değerleri için grafik çözümü Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. SCS eğri numarası yönteminde yağış-akış ilişkisi (Neitsch ve ark., 2011).

3.1.2.3. Pik akım

Pik akış oranı tahminleri, Rasyonel Metotun bir modifikasyonu ile yapılmaktadır. Rasyonel Metot, i şiddetinde bir yağış belirli bir anda başlar ve süresiz olarak devam ederse, alt havzanın çıkıştaki akışa katkıda bulunduğu konsantrasyon süresi (t_{kons}) kadar akış oranının artacağı fikrine dayanmaktadır. Modifiye Rasyonel Metot, pik akış oranı, alt havzaya konsantrasyon süresi (t_{kons}) boyunca düşen günlük yağış oranının, günlük yüzey akış hacminin ve alt havza konsantrasyon süresinin bir fonksiyonudur. Alt havzaya konsantrasyon süresi (t_{kons}) boyunca düşen günlük yağış oranı, stokastik bir teknik kullanılarak toplam günlük yağışın bir fonksiyonu olarak tahmin edilmektedir. Alt havza konsantrasyon süresi, hem arazi hem de kanal akışı dikkate alınarak Manning Formülü kullanılarak tahmin edilmektedir.

Hershfield (1961) tarafından farklı süreler ve frekanslar için toplanan yağış verilerinin analizi, konsantrasyon süresi sırasında düşen yağmur miktarının 24 saatlik süre boyunca düşen yağmur miktarıyla orantılı olduğunu göstermiştir. Konsantrasyon süresi sırasında düşen yağmur miktarı R_{tc} denklem 3.8 ile hesaplanmaktadır.

$$R_{tc} = \alpha_{tc} \times R_{day} \quad (3.8)$$

Konsantrasyon süresi sırasında meydana gelen günlük yağışın kesiri α_{tc} ise denklem 3.9 ile hesaplanmaktadır. Burada, R_{day} , gün boyunca düşen yağmur miktarıdır (mm). Kısa süreli yağışlar için, yağmurun tamamı veya çoğu konsantrasyon süresi sırasında düşmekte ve α_{tc} 'nin üst sınırı olan 1.0'a yaklaşmasına neden olmaktadır. Asgari α_{tc} değeri, uniform şiddetteki yağışlarda görülmektedir. SWAT, en şiddetli yağışın olduğu yarım saatte düşen günlük yağmur oranının bir fonksiyonu olarak konsantrasyon süresinde düşen yağmur oranını tahmin etmektedir.

$$\alpha_{tc} = 1 - \exp[2 \times t_{kons} \times \ln(1 - \alpha_{0.5})] \quad (3.9)$$

Burada $\alpha_{0.5}$, yarım saatlik en yüksek şiddetli yağışta düşen günlük yağmur oranıdır ve t_{kons} , alt havza için konsantrasyon süresidir (saat). Pik akış oranını tahmin etmek için kullanılan Modifiye Rasyonel Metot, denklem 3.10'da gösterilmektedir.

$$q_{pik} = \frac{\alpha_{tc} \times Q_{yüzey} \times Alan}{3.6 \times t_{kons}} \quad (3.10)$$

Burada q_{pik} , pik akış oranı (m^3/s), α_{tc} , konsantrasyon süresi boyunca meydana gelen günlük yağış oranı, $Q_{yüzey}$, yüzey akışı (mm), $Alan$, alt havza alanı (km^2), t_{kons} , alt havza için konsantrasyon süresi (saat) ve 3.6, birim dönüştürme faktörüdür (Neitsch ve ark., 2011).

3.1.2.4. Evapotranspirasyon

Evapotranspirasyon, dünyanın yüzeyinde veya yakınında, sıvı veya katı fazdaki suyun atmosferik su buharı haline geldiği tüm süreçler için ortak bir terimdir. Evapotranspirasyon, nehirlerden ve göllerden buharlaşma, çıplak topraktan ve bitkilerin yapraklarından buharlaşma (terleme) ile buz ve kar yüzeylerinden

süblimleşmeyi içermektedir. Evapotranspirasyon, suyun bir havzadan uzaklaştırıldığı birincil mekanizmadır. Kıtalarla düşen yağışın kabaca %62'si buharlaşma yoluyla oluşmaktadır. Çoğu nehir havzasında ve Antarktika hariç tüm kıtalarda evapotranspirasyon yüzey akışını aşmaktadır (Dingman, 1994).

Potansiyel evapotranspirasyon, sınırsız toprak suyu kaynağına erişimi olan büyüyen bitki örtüsü ile tamamen ve düzgün bir şekilde kaplı geniş bir alandan evapotranspirasyonun meydana gelme hızıdır. Bu oranın, adveksiyon veya ısı depolama etkileri gibi mikro iklimsel süreçlerden etkilenmediği varsayılmaktadır. Potansiyel evapotranspirasyonu tahmin etmek için çok sayıda yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden üçü SWAT'a dahil edilmiştir. Bu yöntemler; Penman-Monteith yöntemi (Monteith (1965)), Priestley-Taylor yöntemi (Priestley ve Taylor (1972)) ve Hargreaves yöntemi (Hargreaves ve ark., 1985). Farklı bir potansiyel evapotranspirasyon yönteminin uygulanması tercih edilirse, model günlük potansiyel evapotranspirasyon değerlerini de okumaktadır. SWAT içerisinde bulunan üç potansiyel evapotranspirasyon yöntemi, gerekli girdilerin çeşitine göre değişmektedir. Penman-Monteith yöntemi güneş radyasyonu, hava sıcaklığı, bağıl nem ve rüzgar hızı verileri gerektirirken, Priestley-Taylor yöntemi güneş radyasyonu, hava sıcaklığı ve bağıl nem verileri gerektirmektedir. Hargreaves yönteminde ise yalnızca hava sıcaklığı gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında potansiyel evapotranspirasyon yöntemi olarak her üç yöntem ile de yapılan temel model sonuçlarının incelenmesine istinaden akım gözlem verileri ile daha iyi uyum gösterdiği görülen Hargreaves yöntemi tercih edilmiştir. Bu yöntem denklem 3.11'de gösterilmektedir.

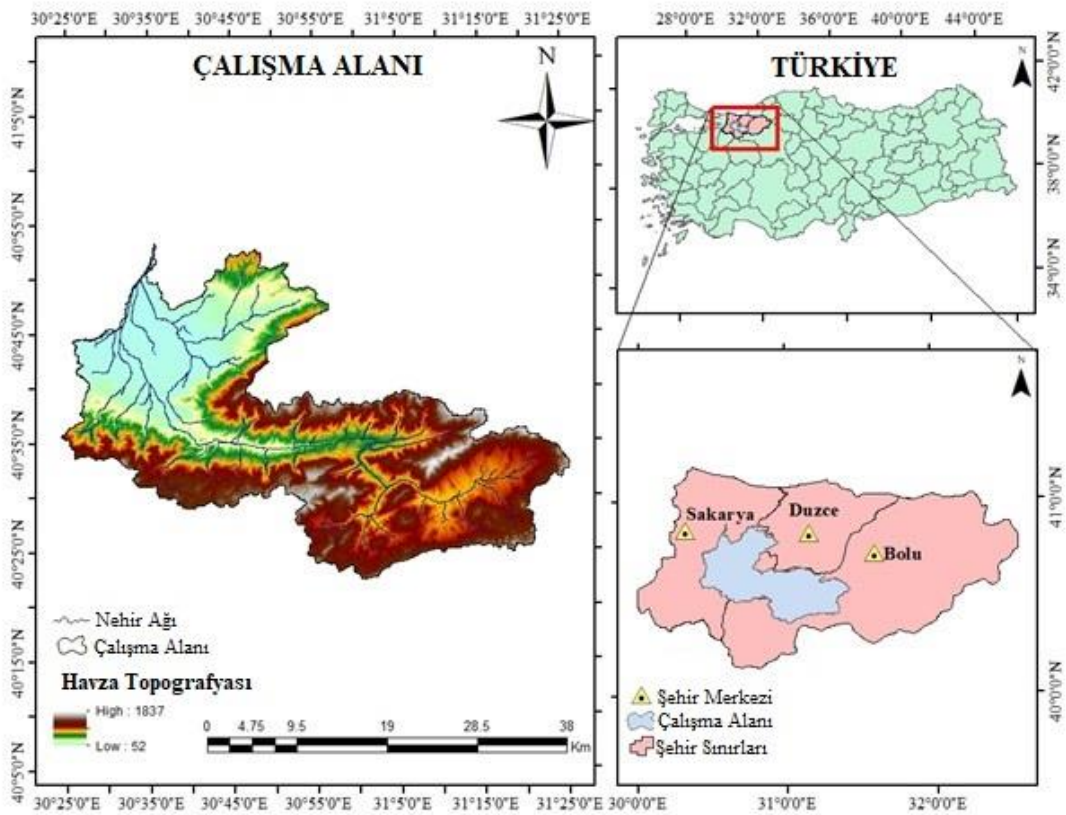
$$\lambda E_o = 0.0023 \times H_0 \times (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} \times (\bar{T}_{av} + 17.8) \quad (3.11)$$

Burada λ gizli buharlaşma ısısı (MJ/kg), E_o , potansiyel evapotranspirasyon (mm/gün), H_0 dünya dışı radyasyon (MJ/m² gün), T_{mx} , ilgili gün için maksimum hava sıcaklığı (°C), T_{mn} , ilgili gün için minimum hava sıcaklığı (°C), $\bar{T}_{av}$ ise ilgili gün için ortalama hava sıcaklığıdır (°C) (Neitsch ve ark., 2011).

3.2. SWAT Model Kurulumu

3.2.1. Çalışma alanı

Mudurnu Çayı Havzası, 30°24'22" – 31°25'25" doğu boylamları ile 40°22'25" – 40°53'17" kuzey enlemleri arasında yer almaktadır. Havza alanı Sakarya, Bolu ve Düzce illeri sınırları içerisinde yer almaktadır (Şekil 3.3). Sakarya Nehri'nin kollarından biri olan Mudurnu Çayı, Aşağı Sakarya Alt Havzası'nda yer almakta olup 131 km uzunluğundadır. Havzada bulunan diğer büyük akarsu kolu ise 41 km uzunluğunda olan Dinsiz Çayı'dır. Bu iki çay Sakarya Nehri'ne birleşim noktasının 6,5 km membasında birleşerek Sakarya Nehri'ne katılmaktadır.



Şekil 3.3. Mudurnu Çayı Havzası konum haritası.

Mudurnu Çayı Havzası 2.211 km² drenaj alanına sahip olup havzada işletmede bulunan bir baraj veya gölet bulunmamaktadır. Devlet Su İşleri tarafından Sakarya ve Kocaeli illerinin içmesuyu ihtiyacını karşılamak üzere akarsu üzerinde Ballıkaya Barajı inşaatı devam etmektedir. Temelden 98 m yükseliğinde Silindirle Sıkıştırılmış Beton Baraj (SBB) tipinde olan baraj yıllık toplam 189 hm³ (6 m³/s) su temin edecektir (DSİ, 2010).

3.2.2. Model girdi verileri

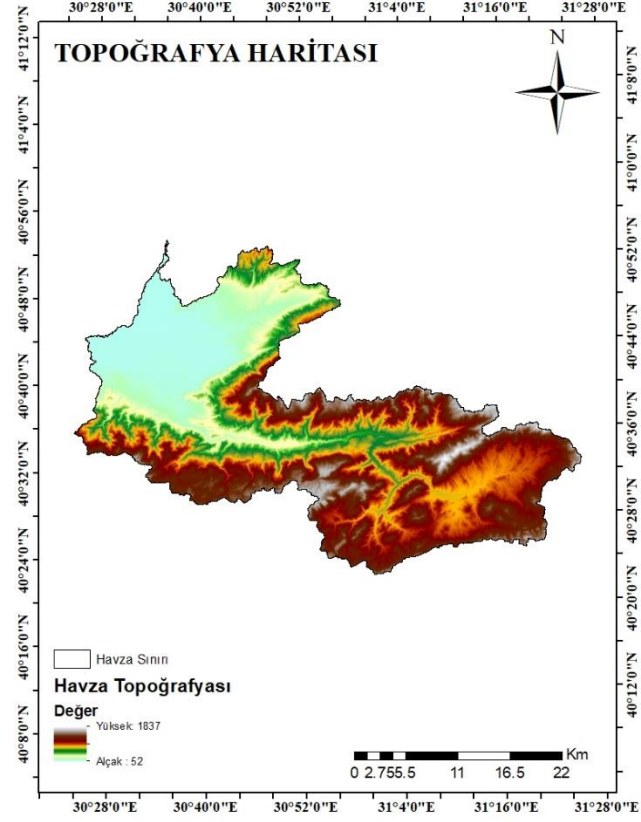
SWAT modelinin kurulumu için sayısal yükseklik modeli (DEM), arazi örtüsü ve kullanımı haritası (LULC), toprak özellikleri haritası ve iklim verileri olmak üzere dört adet veri gereklidir. Ayrıca kurulan modelden çıkacak olan akım sonuçlarının kalibrasyonunda kullanmak için akım gözlem verilerine de kalibrasyon aşamasında ihtiyaç duyulmaktadır. Tablo 3.1’de model kurulumu ve kalibrasyonunda kullanılmış olan verilerin bilgileri yer almaktadır.

Tablo 3.1. Çalışmada kullanılan verilerin tanımı ve çözünürlüğü.

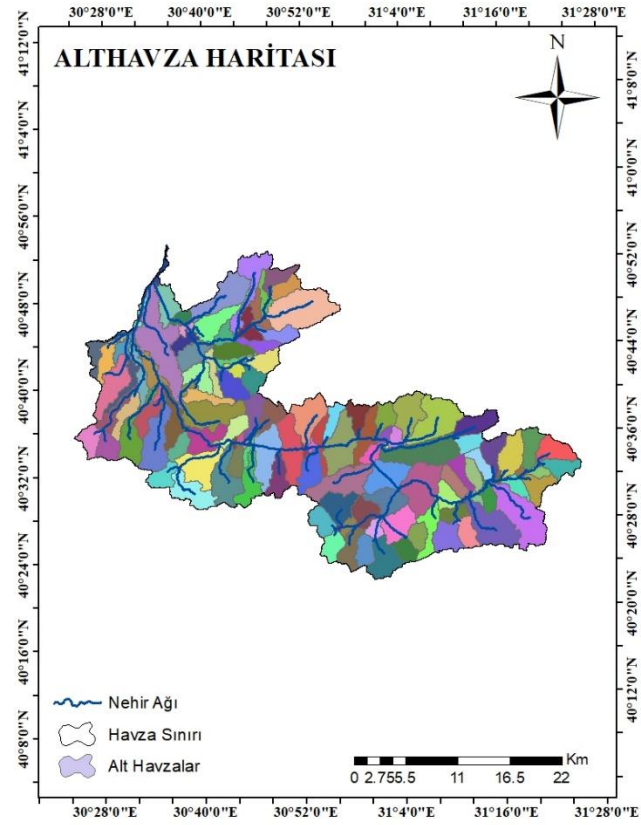
Veri Tipi	Kaynak	Veri Çözünürlüğü
Sayısal Yükseklik Modeli (DEM)	Gelişmiş Kara Gözlem Uydusu (ALOS-PALSAR)	12.5 m
Arazi Örtüsü ve Kullanımı Haritası	Avrupa Uzay Ajansı (ESA) WorldCover 2020	10 m
Toprak Haritası	UNESCO - FAO Küresel Toprak Haritası	5 km
İklim Verileri	Meteoroloji Genel Müdürlüğü	2 İstasyon
Akım Gözlem Verileri	Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü	3 İstasyon

3.2.2.1. Sayısal yükseklik modeli (DEM)

Sayısal yükseklik modeli, Japon Havacılık ve Uzay Araştırma Ajansı (JAXA) tarafından geliştirilmiş olan Gelişmiş Kara Gözlem Uydusu (ALOS-PALSAR) uydusunun açık kaynaklı verileri Alaska Uydu Tesisi (ASF) veritabanından elde edilmiştir (Şekil 3.4). Sayısal yükseklik haritası (DEM) altlığında ArcSWAT programının kendi havza çizimi modülü kullanılarak alt havzalar ve akım ağları oluşturulmuştur. Ancak arazi eğiminin düşük olduğu ova kesimlerinde çizilen akım ağlarının gerçek güzergahlara uymadığı görülmüştür. Bu sorunun çözümü için Google Earth üzerinden gerçek akarsu hatları çizilerek programın “burn-in” komutu ile akım ağları doğru lokasyonlarına getirilmiştir. Havza alanı 2.211,3 km² olarak bulunmuş olup, havza 135 alt havzaya bölünmüş ve toplam 3459 adet hidrolojik işlem birimi (HRU) oluşturulmuştur (Şekil 3.5).



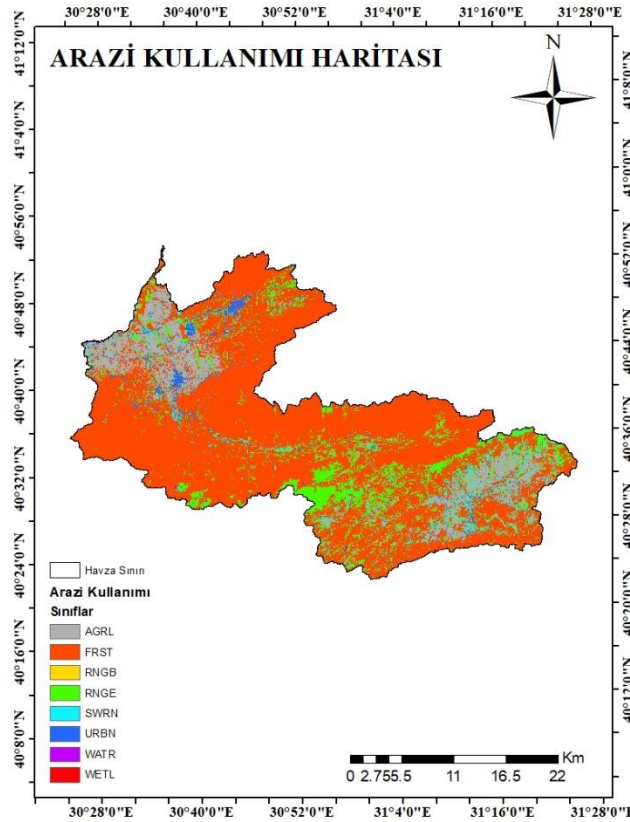
Şekil 3.4. Mudurnu Havzası sayısal yükseklik modeli.



Şekil 3.5. Akım ağları ve alt havzalar.

3.2.2.2. Arazi kullanımı ve örtüsü haritası (LULC)

Arazi örtüsü ve kullanımı haritası Avrupa Uzay Ajansı (ESA) tarafından Sentinel-1 ve Sentinel-2 uydu görüntülerinin işlenmesiyle 11 sınıftan oluşan WorldCover 2020 projesinden temin edilmiştir (Şekil 3.6). Arazi sınıflandırmasına göre havzada 7 farklı arazi kullanımı ve örtü çeşidi olup havzanın bileşimi, arazi kullanımı ve örtüsü tipi, kaynak sınıflandırması ve eşleştirilen SWAT sınıflandırması Tablo 3.2’de gösterilmektedir.



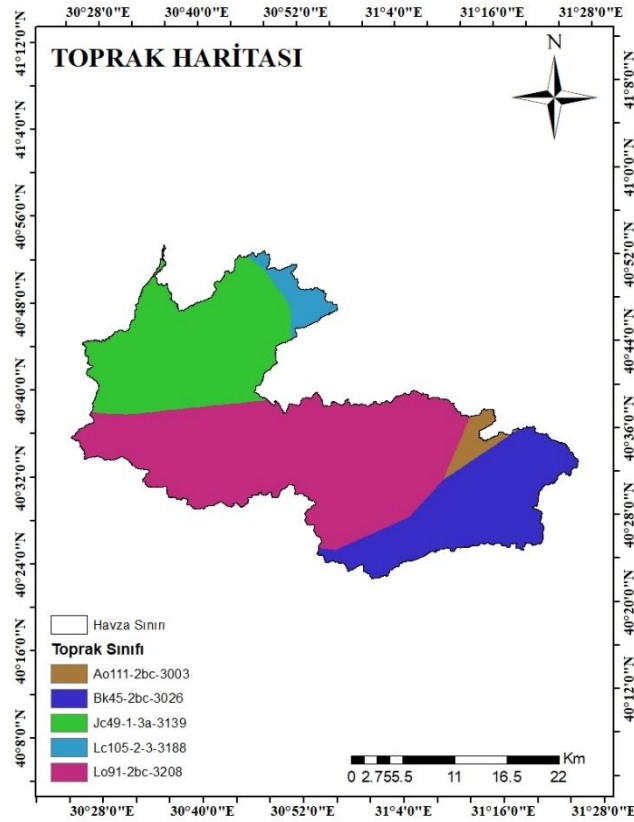
Şekil 3.6. Arazi örtüsü ve kullanımı haritası.

Tablo 3.2. Arazi kullanımı ve örtüsü sınıfları, tanımları ve yüzdeleri.

WorldCover Sınıfı	SWAT Sınıfı	Kapladığı Alan (%)
Ağaç Örtüsü (Tree Cover)	Orman (FRST)	71,85
Tarla (Cropland)	Tarım Arazisi (AGRL)	11,44
Otlak (Grassland)	Otlar (RNGE)	11,40
Çıplak/Seyrek Bitki Örtüsü (Bare/sparse vegetation)	ABD Güneybatısı Çorak Bölge Örtüsü (SWRN)	3,31
Yerleşik Alan (Built-up)	Yerleşim Alanı (URBN)	1,92
Çalılık (Shrubland)	Çalılık (RNGB)	0,04
Kalıcı Su Kütlesi (Permanent water bodies)	Su (WATR)	0,04

3.2.2.3. Toprak haritası

Toprak özellikleri haritası UNESCO kuruluşu olan Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından bütün dünya için hazırlanmış olan Digital Soil Map of the World veritabanından açık kaynaklı şekilde elde edilmiştir (Şekil 3.7). Toprak sınıflandırmasına göre havzada 5 farklı toprak çeşidi olup havzanın bileşimi, toprak tipi, kaynak sınıflandırması ve eşleştirilen SWAT sınıflandırması Tablo 3.3’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Toprak haritası.

Tablo 3.3. Toprak sınıfları, tanımları ve yüzdeleri.

FAO Sınıfı ve Kodu	SWAT Kodu	Kapladığı Alan (%)
Andezit, Granit, Şist (Lo91-2bc)	3208	47,09
Akarsu Alüvyonu (Jc49-1-3a)	3139	27,60
Şist, Kireçtaşı, Marn (Bk45-2bc)	3026	20,32
Killi Şist (Lc105-2-3)	3188	2,94
Şist Kumtaşı Kireçtaşı (Ao111-2bc)	3003	2,05

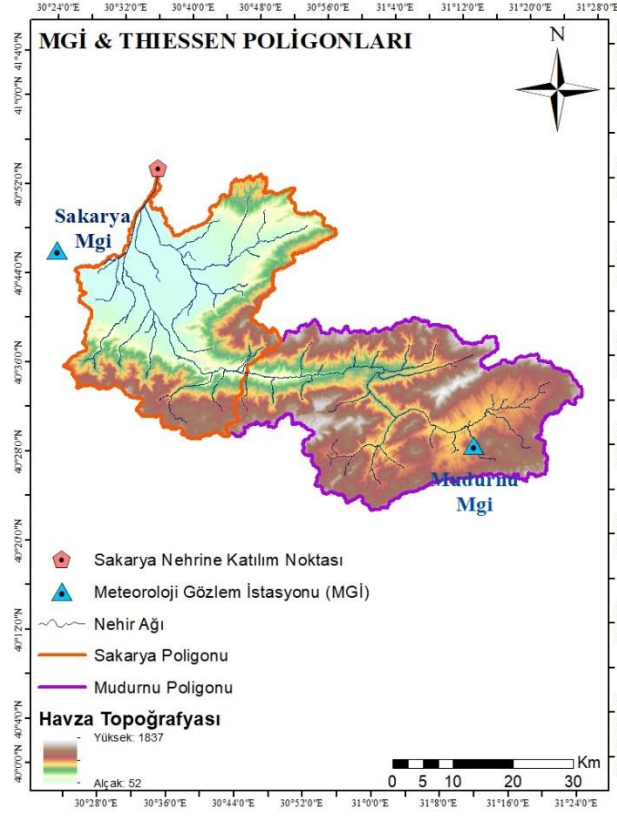
3.2.2.4. Meteorolojik veriler

İklim verileri, Mudurnu Çayı Havzası çevresindeki Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından kurulmuş olan 12 adet Meteoroloji Gözlem İstasyonu (MGİ) verileri analiz edilerek seçilmiştir. Havzanın yağış ve sıcaklık karakteristiğini yansıtmaması ve ayrıca SWAT modelinin kurularak doğru sonuçlar vereceği yeterli sürede çalıştırılabilmesi için Sakarya MGİ ve Mudurnu MGİ verileri kullanılmıştır (Şekil 3.8). Havzanın önemli bir bölümünün yer aldığı Akyazı ve Hendek ilçelerinde kurulu olan meteoroloji gözlem istasyonlarının gözlem sürelerinin çok kısa olması nedeniyle bu istasyonlar kullanılmamıştır. Bunların yerine bu kesim ile benzer yağış ve sıcaklık karakteristiği gösteren ve en yakında bulunan istasyon olan Sakarya MGİ verileri kullanılmıştır. Havzanın membasında bulunan Mudurnu MGİ'nin gözlem kayıtları 1995 yılında bitmektedir. Gözlem verileri günümüze kadar devam etmemesine rağmen civardaki istasyonların havzanın iklim karakteristiğini yansıtmaması nedeniyle ve Mudurnu MGİ gözlem süresi olarak yeterli olduğundan havzanın bu kesimi için Mudurnu MGİ verileri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan MGİ veri bilgileri Tablo 3.4'te gösterilmektedir.

Tablo 3.4. Çalışmada kullanılan MGİ veri bilgileri.

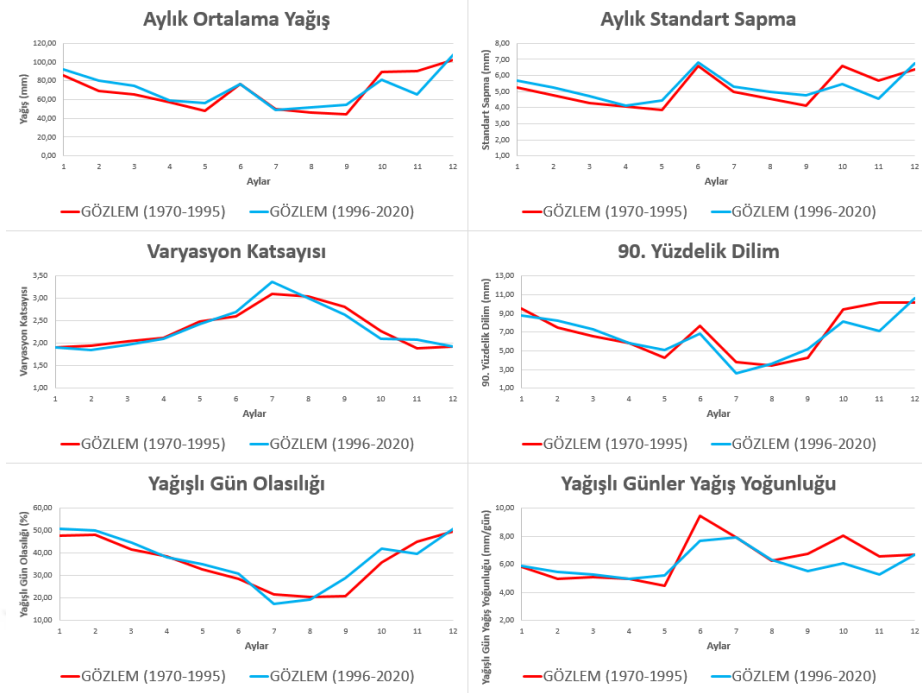
İstasyon Kodu	İstasyon Adı	Kot (m)	Veri Zaman Aralığı	Seçilen Model Çalışma Süresi
17069	Sakarya	28	1960 - 2022	1978 - 1995
18158	Mudurnu	858	1965 - 1995	

SWAT, Thiessen poligonu yaklaşımına göre hangi istasyonun hangi alt havzayı temsil ettiğini belirlemekte olup bunun sonucunda Mudurnu Çayı Havzası'nın meteoroloji gözlem istasyonları açısından temsiliyeti Şekil 3.8'de gösterilmektedir. Havzada yükseltisi 1600 m civarında olan dağ sıraları bulunması ve Sakarya istasyonunun 28 m, Mudurnu istasyonunun 858 m kotlarında yer almaları nedeniyle dağlık kesimlerin yağış ve sıcaklık değerlerinin gözlem istasyonları tarafından tam olarak yansıtılamamasından dolayı yükselti şeritleri (elevation band) oluşturulmuştur.

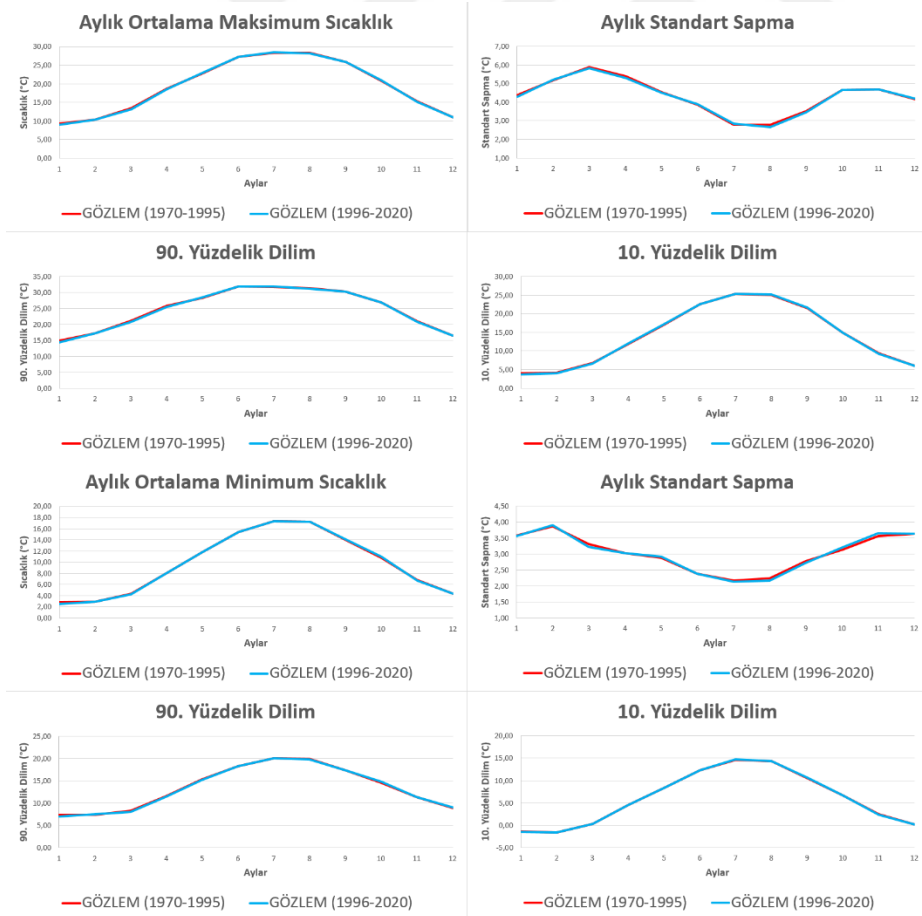


Şekil 3.8. MGİ lokasyonları ve temsil ettiği alanlar.

MGİ veri zaman aralıkları dikkate alınarak, kurak ve yağışlı periyotları kapsayacak şekilde modelin çalışma süresi 18 yıl olarak belirlenmiştir. Mudurnu MGİ'nin 1995 yılından sonra kapanması nedeniyle kısıtlayıcı bir faktör olarak modelin çalışma süresi 1995 yılına kadar seçilmiştir. Bu zamandan günümüze bölgedeki yağış ve sıcaklık değerlerinde gerçekleşebilecek anlamlı bir değişikliğin olup olmadığını tespit etmek için günümüze kadar ölçümleri bulunan Sakarya MGİ verileri baz alınarak iki ayrı dönemin iklim indisleri hesaplanmıştır. Yağış verileri için; aylık ortalama yağış, aylık standart sapma, varyasyon katsayısı, 90. yüzdelik dilim, yağışlı gün olasılığı ve yağışlı günler yağış yoğunluğu hesaplanarak Şekil 3.9'da, sıcaklık verileri için; aylık ortalama maksimum sıcaklık, aylık ortalama minimum sıcaklık, aylık standart sapma, 90. yüzdelik dilim, 10. yüzdelik dilim hesaplanarak Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Bu indislere göre modelin çalışma yıllarında gözlemlenen yağış ve sıcaklık değerleri ile günümüze kadar olan dönem arasındaki yağış ve sıcaklık değerleri arasında anlamlı bir farklılık bulunmadığı ve günümüz iklim koşullarını yansıttığı görülmüştür.



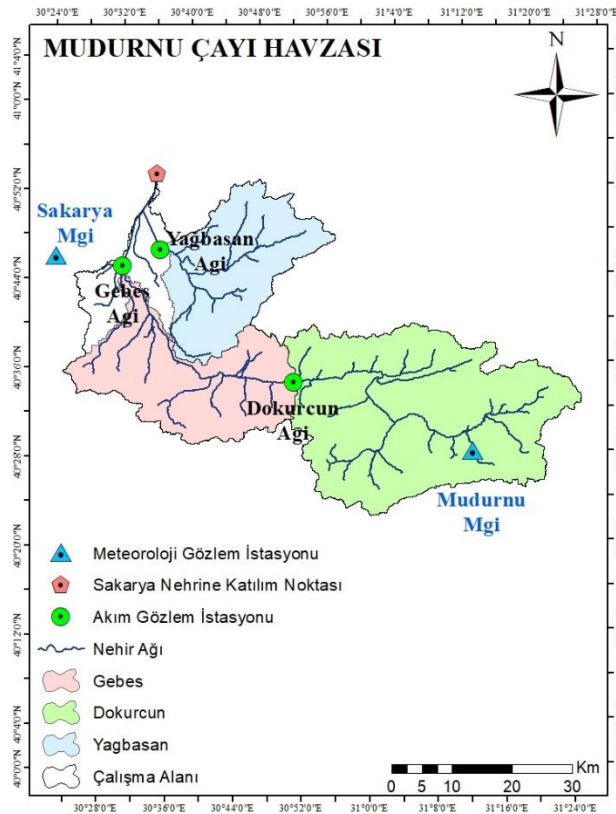
Şekil 3.9. Sakarya MGİ 1970-1995 ve 1996-2020 periyotlarındaki yağış indislerinin karşılaştırılması.



Şekil 3.10. Sakarya MGİ 1970-1995 ve 1996-2020 periyotlarındaki sıcaklık indislerinin karşılaştırılması.

3.2.2.5. Akım gözlem verileri

Modelin verdiği akım sonuçlarının kalibrasyon ve validasyonunu yapmak için havzada bulunan 4 adet Akım Gözlem İstasyonu (AGİ) ölçüm verileri kullanılmıştır. Bunlardan Parseller ve Gebeş istasyonları birbirinin ardı sıra yaklaşık aynı lokasyonda açılmış istasyonlardır. Bu iki istasyonun verileri birleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan AGİ'lerin konumu ve kapsadıkları alt havzalar Şekil 3.11'de, AGİ'lere ait bilgiler Tablo 3.5'te gösterilmektedir. Burada yeşil alan Dokurcun AGİ alt havza alanını, pembe alan Gebeş AGİ alt havza alanını, mavi alan ise Yağbasan AGİ alt havza alanını ifade etmektedir.

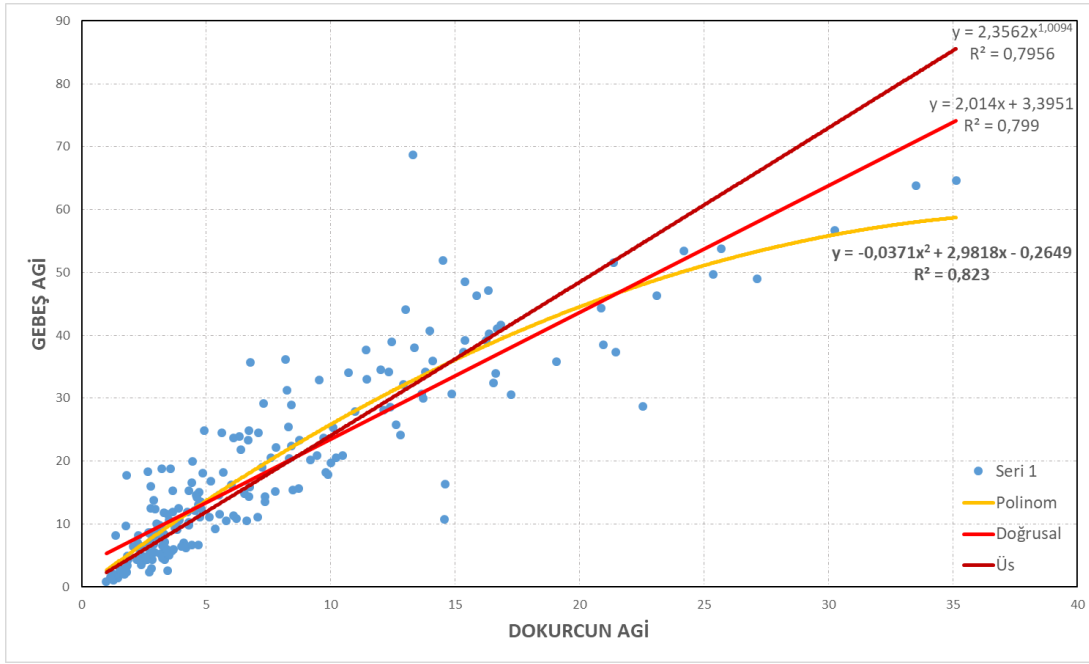


Şekil 3.11. Çalışmada kullanılan AGİ konumları ve alt havza alanları.

Tablo 3.5. Çalışmada kullanılan AGİ veri bilgileri.

İstasyon Kodu	İstasyon Adı	Akarsu	Yağış Alanı (km ²)	Ölçüm Zaman Aralığı	Eksik Yıllar
E12A037	Dokurcun	Mudurnu	1073,4	1956 - 2011	
D12A121	Parseller	Mudurnu	1522,5	1972 - 1979	
D12A136	Gebeş	Mudurnu	1521,0	1978 - 1983	
E12A019	Yağbasan	Dinsiz	410,8	1953 - 2011	1969-1970

Modelin çalışma yılları aralığında Gebeş AGİ'nin ölçüm verilerinde eksik yıllar bulunmaktadır. Bu nedenle Mudurnu Çayı anakolu üzerinde Gebeş AGİ'nin 41 km membasında bulunan Dokurcun AGİ ölçümleri kullanılarak Gebeş AGİ verileri çalışmanın bitiş yılı olan 1995 yılına uzatılmıştır. Gebeş AGİ ile Dokurcun AGİ arasında yapılan regresyon analizi sonucu aynı akarsu kolu üzerinde bulunan iki AGİ arasında bulunan korelasyon Şekil 3.12'de gösterilmektedir. Gebeş AGİ ile Dokurcun AGİ arasındaki determinasyon katsayısı (R^2) 0,823 bulunarak iki AGİ arasındaki korelasyonun oldukça yüksek olduğu görülmüştür.



Şekil 3.12. Gebeş AGİ ile Dokurcun AGİ arasındaki korelasyon grafiği.

Çalışmada kullanılan 3 adet AGİ'nin ölçüm verileri analiz edilerek Mudurnu Çayı ve Dinsiz Çayında ilgili AGİ'nin membasındaki baz akımları tespit edilmiştir (Tablo 3.6). Bulunan baz akım değerleri söz konusu akarsu kollarının uygun yerlerinden modele noktasal kaynak olarak eklenmiştir.

Tablo 3.6. Modelde kullanılan baz akım değerleri.

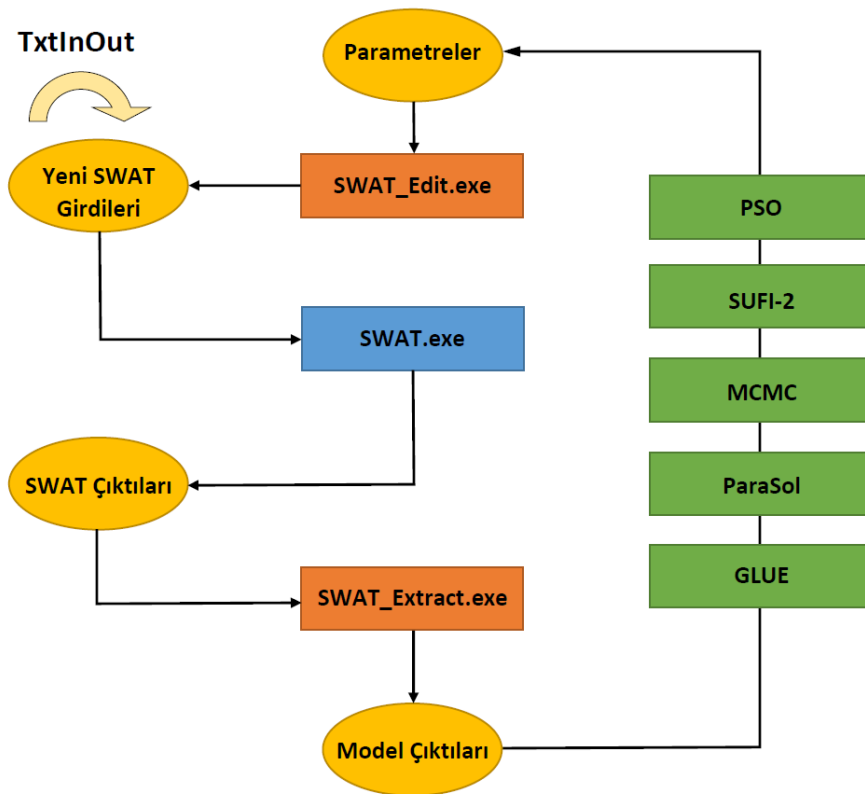
AGİ Adı	Akarsu	Baz Akım (m³/s)
Dokurcun	Mudurnu Çayı	2,10
Gebeş	Mudurnu Çayı	4,82
Yağbasan	Dinsiz Çayı	1,10

3.3. Model Kalibrasyonu ve Validasyonu

Modele girilen verilerin temel parametreleri kullanılarak modelin ilk kez çalıştırılması neticesinde sonuç olarak alınan akım verilerinin, gözlemlenen akım verilerine uyumluluğu modelin başarısını ifade etmektedir. Modelin verdiği sonuçlar ile gözlemlenen akım verilerinin uyumluluğunu arttırmak ve bu sayede modelin performansını yükseltmek amacıyla kalibrasyon işlemi, bunu doğrulamak için de validasyon işlemi yapılmaktadır.

3.3.1. SWAT-CUP

Kalibrasyon ve validasyon işlemi için SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Programs) programı kullanılmıştır. Bu program aynı zamanda hassasiyet ve belirsizlik analizi de yapmaktadır. Program içerisinde optimizasyon algoritması olarak SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting), PSO (Particle Swarm Optimization), GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), ParaSol (Parameter Solution) ve MCMC (Markov Chain Monte Carlo) olmak 5 farklı yöntem bulunmaktadır. Şekil 3.13’de programın çalışma düzeni gösterilmektedir.



Şekil 3.13. SWAT-CUP programı çalışma düzeni ve optimizasyon algoritmaları (Abbaspour, 2015).

3.3.2. SUFI-2 algoritması ve belirsizlik analizi

Havza modellerinde, önemli model belirsizlikleri bulunmaktadır. Bu belirsizlikler genel anlamda şu şekilde ayrılmaktadır (Abbaspour (2015));

- a) Kavramsal (yapısal) model belirsizliği. Kavramsal modeldeki basitleştirmelerden kaynaklanan, havzada meydana gelen ancak modele dahil edilmeyen süreçlerden kaynaklanan, modele dahil olan ancak havzadaki oluşumları modelleyici tarafından bilinmeyen süreçlerden kaynaklanan ve modelleyici tarafından bilinmeyen ile modele dahil edilmeyen süreçlerden kaynaklanan model belirsizliklerinden biri olabilmektedir.
- b) Girdi belirsizliği. Yağış gibi girdi verilerindeki hataların ve daha da önemlisi dağıtılmış modellerde noktalasal verilerin geniş alanlara yayılmasından kaynaklanmaktadır.
- c) Parametre belirsizliği. Genellikle ters modellemede parametrelerin doğal benzersiz olmamasının bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Parametreler süreçleri temsil etmektedir. Süreçlerin birbirini telafi edebilmesi gerçeği, aynı çıktı sinyalini üreten birçok parametre setinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

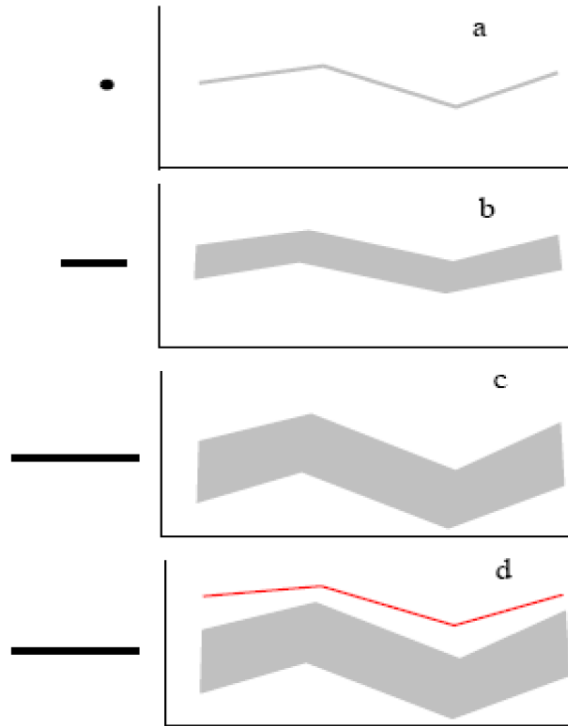
Deterministik bir yaklaşımda tek bir parametre seti, tek bir model sinyali ile sonuçlanmaktadır. Ters uygulama olan kalibrasyonda ise ölçülen değişken binlerce farklı parametre seti ile yeniden üretilebilmektedir. Bu benzersiz olmama, dağıtılmış hidrolojik uygulamalarda model kalibrasyonunun doğal bir özelliğidir (Abbaspour ve ark., 2018).

Stokastik kalibrasyonda, modelleme çalışmasındaki hatalar ve belirsizlikler tanınmakta, bir dereceye kadar doğal sistemlerdeki süreçler hakkındaki bilgisizlik ve anlama eksikliği tamamlanmaya çalışılmaktadır. Kalibrasyon ve belirsizlik arasında yakın bir ilişki vardır. Modellemede belirsizliği tespit etmek gerekli işlemlerden biridir. Belirsizlik olmadan yapılan bir kalibrasyon yeterince anlamlı olmamakta ve yanıltıcı olabilmektedir. Ayrıca, kalibre edilmiş modelle yapılan herhangi bir analizin, parametre belirsizliklerini yayarak sonuçtaki belirsizliği içermesi gerekmektedir.

SUFI-2 algoritmasında parametrelerdeki belirsizlik, yürütülen değişkenlerdeki (örneğin yağış) belirsizlik, kavramsal model, parametreler ve ölçülen verilerdeki belirsizlik gibi tüm belirsizlik kaynakları hesaba katılarak aralıklar (düzgün

dağılımlar) olarak ifade edilmektedir. Parametrelerdeki belirsizliklerin yayılması %95 olasılık dağılımları olarak ifade edilen model çıktı değişkenlerindeki belirsizliklere yol açmaktadır. Bu belirsizlik, Latin hiperküp örnekleme kullanılarak parametrelerdeki belirsizliklerin yayılmasıyla oluşturulan bir çıktı değişkeninin kümülatif dağılımının %2,5 ve %97,5 seviyelerinde hesaplanmaktadır. Bu %95 tahmin belirsizliği veya 95PPU olarak adlandırılmaktadır. 95PPU, model çıktısını temsil eden tek bir sinyali değil, belirli parametre aralıkları tarafından üretilen iyi çözümlerin bir zarfını ifade etmektedir.

95PPU olarak ifade edilen simülasyon sonucu ile tek bir sinyal olarak ifade edilen gözlem arasındaki uyumu ölçmek için p-faktörü ve r-faktörü olarak iki istatistik bulunmaktadır. P-faktörü Şekil 3.14’de gösterilen modelleme çıktısı olan gri renkli 95PPU bandı tarafından kapsanan gözlem verilerinin yüzdesidir. R-faktörü ise bu 95PPU bandının kalınlığını ifade etmektedir. Teorik olarak p-faktörü 0 ile %100 aralığında, r-faktörü ise 0 ile sonsuz arasında değişmektedir. Akım sonuçları kalibrasyonu için R-faktörü 1 iken p-faktörün $>70\%$ olması önerilmektedir (Abbaspour, 2015).



Şekil 3.14. Parametre belirsizliği ile model tahmini belirsizliği arasındaki ilişkiyi gösteren şekil (Abbaspour, 2015).

Validasyon, kalibre edilmiş parametrelerde güven oluşturmak için kullanılmaktadır. Bu amaçla, kalibre edilmiş parametre aralıkları, başka değişiklik yapılmadan bağımsız bir ölçüm veri kümesine uygulanmaktadır. Son kalibrasyon yinelemesinde olduğu gibi aynı sayıda simülasyonla bir yineleme yapılmakta ve kalibrasyona benzer şekilde doğrulama sonuçları da p-faktörü, r-faktörü ve amaç fonksiyonu değeri ile nicelendirilir.

3.3.3. Parametre hassasiyet analizi

Hassasiyet analizi, modeldeki en önemli etki faktörünün tanımlanmasını ifade etmektedir. Duyarlılık analizi iki açıdan önemlidir; bunlardan birincisi parametreler süreçleri temsil etmekte olup duyarlılık analizi çalışma bölgesindeki en önemli süreçler hakkında bilgi sağlamaktadır. Duyarlılık analizinin diğer önemi, hassas olmadığı belirlenen parametreleri ortadan kaldırarak kalibrasyon prosedüründeki parametre sayısının azaltılmasına yardımcı olmasıdır. Tekil hassasiyet (one at a time) yaklaşımı, diğer tüm parametreler bir değerde sabit tutulurken bir değişkenin (örneğin akarsu akımı) bir parametredeki değişikliklere duyarlılığını göstermektedir.

Kalibrasyonda kullanılan parametreler için tanımlanan değer aralıkları, model girdi verilerindeki ve literatürdeki sınır değerleri aşmamalıdır. Sisteme su veren kar erime parametreleri (SFTMP, SMTMP, SMFMX, SMFMN, TIMP) ve örtü depolaması (CANMX) diğer parametrelerle eş zamanlı olarak kalibre edilmemelidir. Çünkü bu parametreler tanımlanabilirlik sorunlarına neden olmaktadır. Bu parametreler ilk önce kalibrasyona tabi tutulmalı, bunun sonucundaki en iyi değerlerine sabitlenmeli ve daha sonra kalibrasyondan çıkarılarak diğer seçilen parametreler ile kalibrasyona devam edilmelidir (Abbaspour ve ark., 2018; Abbaspour 2015).

3.3.4. Model performans ölçütleri

Model sonuçlarının gözlem verileri ile uyumluluğunun derecesini, diğer bir anlamda modelin başarısını tespit etmek için birtakım istatistiksel ölçütler kullanılmaktadır. Bu çalışmada determinasyon (korelasyon) katsayısı (R^2), Nash-Sutcliffe verimliliği (NSE), sapma yüzdesi (PBIAS) ve kök ortalama kare hatasının (RMSE) gözlem verilerinin standart sapmasına oranı (RSR) kullanılmıştır.

3.3.4.1. Determinasyon katsayısı (R^2)

Model sonuçları ile gözlem verileri arasındaki doğrusallığın derecesini tanımlamaktadır. R^2 denklem 3.12 ile hesaplanmaktadır. 0 ile 1 arasında değişmekte

olup, daha yüksek değerler model ile gözlem sonuçları arasında daha az hata olduğunu göstermektedir (Moriasi ve ark., 2007).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n [(Q_m - \bar{Q}_m)(Q_s - \bar{Q}_s)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_s - \bar{Q}_s)^2}} \right]^2 \quad (3.12)$$

Denklem 3.12'deki Q_m gözlem verisini, Q_s model sonucunu, $\bar{Q}_m$ gözlem verisi ortalamasını, $\bar{Q}_s$ model sonucu ortalamasını ifade etmektedir.

3.3.4.2. Nash-sutcliffe verimliliği (NSE)

Nash-Sutcliffe verimliliği (NSE), gözlem veri varyansına kıyasla artık varyansın göreceli büyüklüğünü belirleyen normleştirilmiş bir istatistiktir. NSE denklem 3.13 ile hesaplanmaktadır. NSE, $-\infty$ ile 1.0 (1 dahil) arasında değişir ve $NSE = 1$ optimal değerdir. 0,0 ile 1,0 arasındaki değerler genellikle kabul edilebilir performans seviyeleri olarak görülmektedir (Nash ve Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2} \right] \quad (3.13)$$

Denklem 3.13'deki Q_m gözlem verisini, Q_s model sonucunu, $\bar{Q}_m$ gözlem verisi ortalamasını ifade etmektedir.

3.3.4.3. Yanlılık yüzdesi (PBIAS)

Yanlılık yüzdesi, model sonuç verilerinin ortalama eğiliminin gözlem verileri ortalama eğiliminden daha büyük veya daha küçük olmasını ölçmektedir. PBIAS denklem 3.14 ile hesaplanmaktadır. PBIAS'ın optimum değeri 0,0 olup düşük değerler doğru model simülasyonunu göstermektedir. Pozitif değerler, modelin olduğundan düşük tahmin yanlılığını, negatif değerler ise modelin olduğundan fazla tahmin yanlılığını göstermektedir (Gupta ve ark., 1999).

$$PBIAS = 100 \times \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)}{\sum_{i=1}^n Q_m} \right] \quad (3.14)$$

Denklem 3.14'deki Q_m gözlem verisini, Q_s model sonucunu ifade etmektedir.

3.3.4.4. Kök ortalama kare hatasının (RMSE) gözlem verilerinin standart sapmasına oranı (RSR)

RMSE yaygın olarak kullanılan hata indeksi istatistiklerinden biridir. Bu indeks, sonuçların analizine yardımcı olan ilgilenilen bileşenin kare birimlerindeki hatayı gösterdiği için değerlidir. RMSE değerinin 0 olması mükemmel uyumu göstermektedir. Singh ve ark. (2005) tarafından RMSE'nin gözlem verilerinin standart sapmasına oranı (RSR) olarak adlandırılan bir model değerlendirme istatistiği geliştirilmiştir. RSR, gözlem standart sapmasını kullanarak RMSE'yi standartlaştırmakta, böylece elde edilen istatistik ve bildirilen değerler çeşitli bileşenlere uygulanabilmektedir. RSR ne kadar düşük olursa, RMSE o kadar düşük olmakta ve model simülasyon performansı o kadar iyi olmaktadır. RSR denklem 3.15 ile hesaplanmaktadır (Moriasi ve ark., 2007).

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_m} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_m - Q_s)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_m - \bar{Q}_m)^2}} \quad (3.15)$$

Denklem 3.15'teki Q_m gözlem verisini, Q_s model sonucunu, $\bar{Q}_m$ gözlem verisi ortalamasını, $STDEV_m$ gözlem verisi standart sapmasını ifade etmektedir.

Hidrolojik modellerin aylık zaman diliminde akarsu akımı bakımından model başarı performansı Tablo 3.7'deki şekilde derecelendirilmektedir.

Tablo 3.7. Hidrolojik modellerin aylık zaman diliminde önerilen istatistikler için genel performans derecelendirmeleri (Moriasi ve ark., 2015).

Performans Derecesi	R ²	NSE	RSR	PBIAS (%)
Çok İyi	0.85 < R ² ≤ 1.00	0.80 < NSE ≤ 1.00	0.00 ≤ RSR ≤ 0.50	PBIAS < ± 5
İyi	0.75 < R ² ≤ 0.85	0.70 < NSE ≤ 0.80	0.50 < RSR ≤ 0.60	± 5 ≤ PBIAS < ± 10
Tatmin Edici	0.60 < R ² ≤ 0.75	0.50 < NSE ≤ 0.70	0.60 < RSR ≤ 0.70	± 10 ≤ PBIAS < ± 15
Yetersiz	0.60 ≤ R ²	0.50 ≤ NSE	0.70 > RSR	PBIAS ≥ ± 15

3.4. İklim Değişikliği Modeli ve Senaryoları

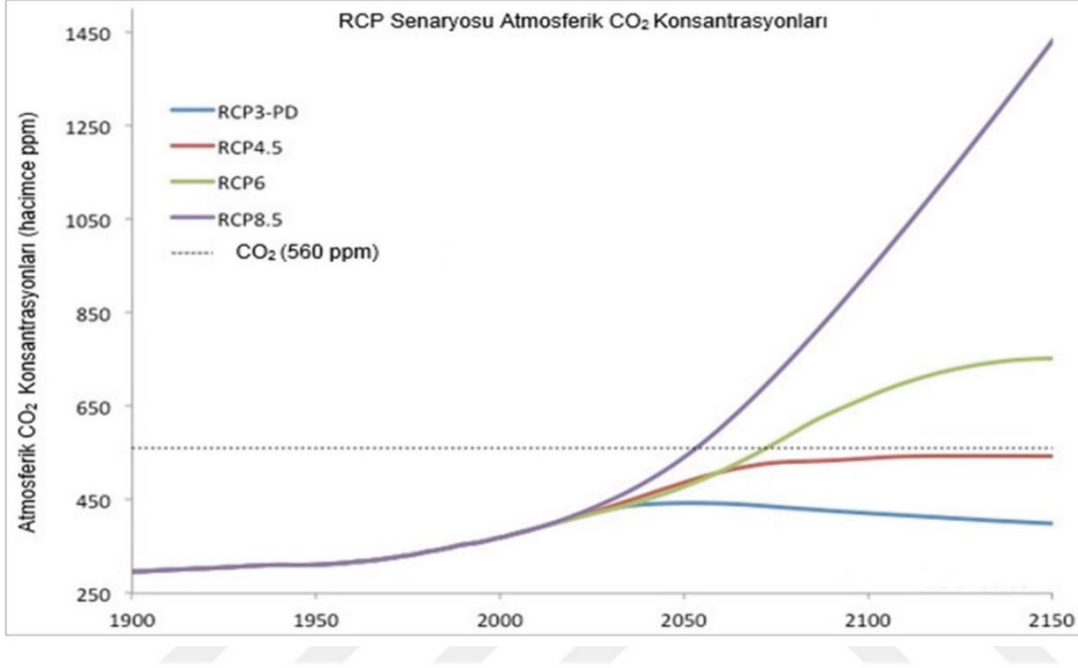
İklim sistemi, atmosfer, kara yüzeyleri, kar ve buz, okyanuslar ve diğer su kütleleri ile canlıları kapsayan karmaşık ve etkileşimli bir sistemdir. Bu sistem, zaman içinde, kendi iç dinamiklerinin etkisi altında ve dış etmenlerdeki (zorlamalar olarak adlandırılmaktadır) değişikliklere bağlı olarak yavaş yavaş değişim göstermektedir.

Dış zorlamalar, volkanik patlamalar ve güneşle ilgili değişkenlikler gibi doğal olaylar ile atmosferin bileşimindeki insan kaynaklı değişiklikleri içermektedir. Günümüzde fosil yakıtların yakılması, arazi kullanımı değişiklikleri, ormansızlaştırma ve sanayi süreçleri gibi insan etkinlikleriyle atmosfere salınan sera gazı birikimlerindeki hızlı artışın doğal sera etkisini artırdığı düşünülmektedir. Yeryüzünden geri yansıyan uzun dalga boylu ışınların bir bölümü, bulutlarca ve atmosferdeki sera etkisini düzenleyen sera gazlarınca (su buharı (H₂O), karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), diazotmonoksit (N₂O), ozon (O₃), vb.) soğurulmaktadır. Sera etkisi dünya ısı dengesi için gerekli bir mekanizmadır. Fakat insan etkileriyle atmosfere salınan ilave gazlar yerküreyi beklenenden daha fazla ısıtmaktadır. Sera gazı emisyonlarındaki bu artış, özellikle 1750'li yıllardan itibaren, yani sanayi devriminden bu yana net olarak gözlemlenmektedir. En önemli sera gazı olan CO₂'nin atmosferdeki birikimi sanayi öncesi dönemde yaklaşık 280 ppm'den (milyonda bir parçacık) 2014 yılında 398ppm'e yükselmiştir. Sanayi devrimi öncesi dönemde yaklaşık 715 ppb (milyarda bir parçacık) olan CH₄ birikimi, 2005 yılında 1774 ppb'e çıkmıştır. Küresel atmosferik N₂O birikimi %18 oranında artış göstermiş ve sanayi devrimi öncesi yaklaşık 270 ppb'den 2005 yılında 319 ppb'e çıkmıştır (MGM, 2015).

İklim değişikliğinin bilimsel temeli, etkileri, gelecekteki riskleri ile uyum ve hafifletme seçenekleri hakkında düzenli bilimsel değerlendirmeler sağlamak üzere Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) tarafından IPCC (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli) 1988 yılında kurulmuştur. Kuruluş tarafından bugüne kadar beş değerlendirme döngüsü ve iklim değişikliği değerlendirme raporu yayımlanmış olup son rapor (AR5) 2014 yılında yayımlanmıştır (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023).

Antropojenik sera gazı emisyonları temel olarak nüfus büyüklüğü, ekonomik faaliyet, yaşam tarzı, enerji kullanımı, arazi kullanım modelleri, teknoloji ve iklim politikası tarafından yönlendirilmektedir. AR5 kapsamında bu faktörlere dayalı projeksiyonlar yapmak için kullanılan Temsili Konsantrasyon Yolları (RCP'ler), sera gazı emisyonları ve atmosferik konsantrasyonlar, hava kirletici emisyonlar ve arazi kullanımına ilişkin dört farklı 21. yüzyıl yolunu tanımlamaktadır. RCP'ler katı bir hafifletme senaryosu (RCP2.6), iki ara senaryo (RCP4.5 ve RCP6.0) ve çok yüksek sera gazı emisyonlarına sahip bir senaryo (RCP8.5) içermektedir. Emisyonları kısıtlamak için ek çabalar içermeyen temel senaryolar RCP6.0 ile RCP8.5 arasında

değişen yollara yol açmaktadır. RCP2.6, küresel ısınmayı sanayi öncesi sıcaklıkların üzerinde 2°C ısınma altında tutmayı amaçlayan bir senaryonun temsilcisidir (IPCC, 2014). Tahmin yapmak için AR5 tarafından kullanılan dört RCP'ye göre tüm zorlayıcı parametrelerin atmosferik CO₂ eşdeğeri konsantrasyonları Şekil 3.15'de gösterilmektedir.



Şekil 3.15. Temsili Konsantrasyon Rotaları (RCP) CO₂ konsatrasyon değerleri (IPCC, 2014; SYGM, 2016).

3.4.1. CMIP5 ve CORDEX platformları

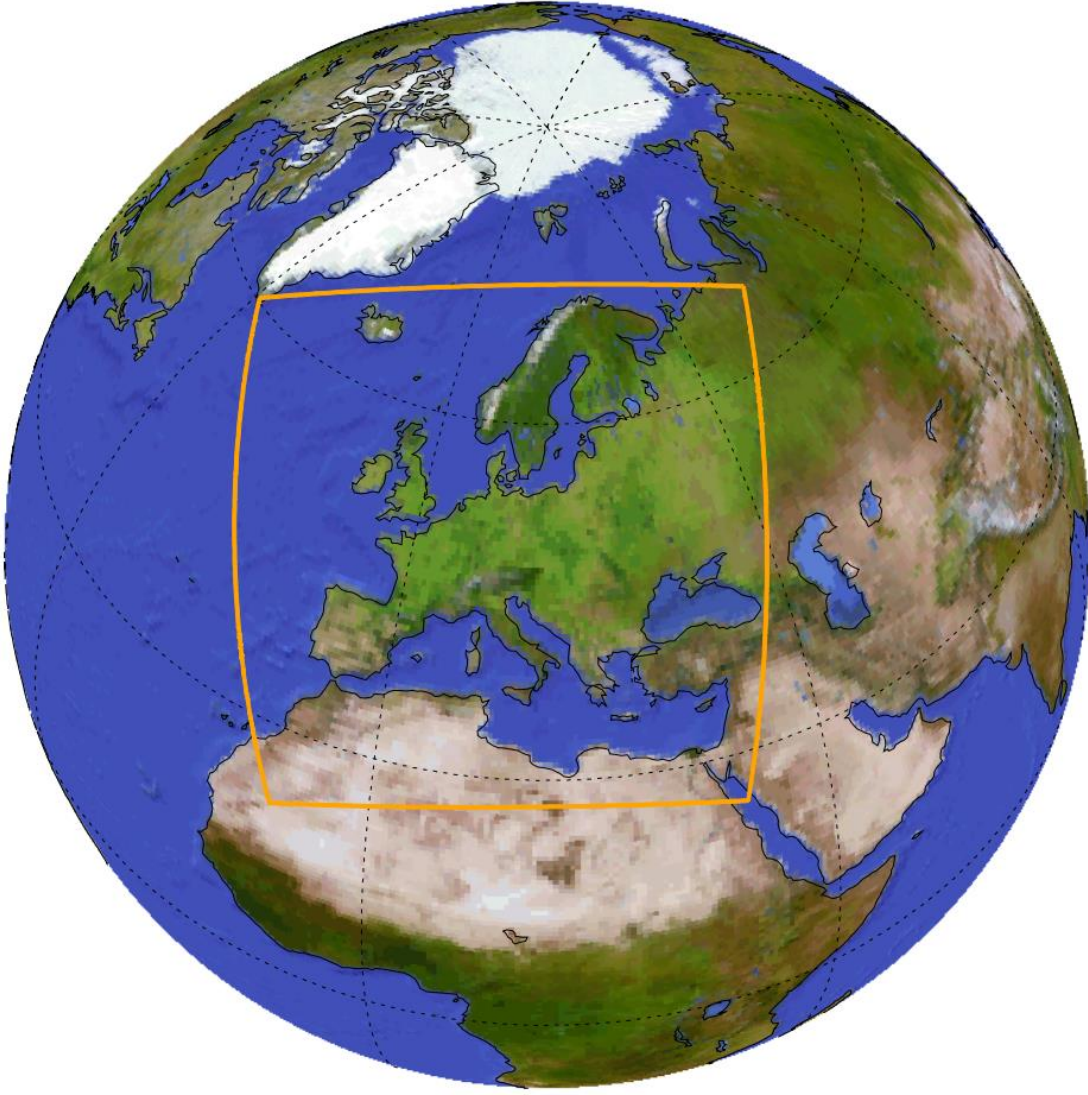
Dünya İklim Araştırma Programı (WCRP) tarafından geçmiş, şimdiki ve gelecekteki iklim değişikliklerini anlamak için iklim projeksiyonları sağlamak amacıyla 1995 yılında Birleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi (CMIP) kurulmuştur. Bir Küresel İklim Modeli (GCM), Dünya'nın iklim sisteminin parçaları olan atmosfer, okyanus, kara yüzeyi, kriyosfer ve biyosfer arasındaki süreçleri ve etkileşimleri dijitalleştiren karmaşık bir bilgisayar kodudur. İnsan faaliyetlerinde gelecekteki değişikliklerin Dünya'nın gelecekteki iklimini nasıl etkileyeceğini, ne kadar ısınacağını, sellerin, kuraklıkların ve diğer aşırılıkların nasıl değişeceğini tahmin etmek için iklim modelleri kullanılmaktadır. Ancak, dünya iklimindeki birçok süreç çok küçük ölçeklerde gerçekleşmekte olup modeller onları tam olarak temsil edememekte ve bu nedenle bazı basitleştirmeler gerekmektedir. İklim sisteminin nasıl basitleştirildiği ilgili modele özeldir. Bu nedenle, farklı modellerden simülasyonları karşılaştırmak, hangi

sonuçların modeller arasında tutarlı olduğunu ve hangi sonuçların üzerinde daha az ortaklaşıldığını anlamak için yararlıdır. Bu çoklu model yaklaşımı, iklim modellerinin değerlendirilmesine yardımcı olmakta, model simülasyonlarında iyileştirmelere yol açmakta ve geçmiş, şimdiki ve gelecekteki iklimlerin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. CMIP'in diğer bir faydası, verileri bünyesinde toplayan ve sürekli büyüyen küresel araştırma topluluğu için açık erişim sağlayan bir küresel altyapı olmasıdır (Coupled Model Intercomparison Project [CMIP], 2023).

Küresel iklim modellerinden (GCMs) elde edilen veriler çok büyük alanları temsil ettiğinden ayrıntılı değildir ve bölgesel analizlere imkân tanımamaktadır. Çok düşük çözünürlükteki gridlenmiş bu bilgileri, tekrar girdi olarak kullanarak daha küçük alanlar için daha ayrıntılı ve yüksek çözünürlüklü bilgiler üretilmesini sağlayan modeller bölgesel iklim modelleri (RCMs) olarak nitelendirilmektedir.

Küresel iklim modellerinin (GCMs) küçük ölçekli olması nedeniyle, bölgesel ve yerel ölçeklerdeki ayrıntılı iklim değişikliği bilgilerini ve yerel aşırı olayların temsilini sağlayan yüksek çözünürlüklü Bölgesel İklim Modelleri (RCMs) oluşturulmuştur. GCM'ler bölgesel iklim modellerine yanal ve alt sınır koşulları sağladığından, RCM'ler GCM'lerden bağımsız değildir. Bu anlamda RCM'ler, GCM'lerin büyüteçleri olarak görülebilir (Copernicus, 2023).

Dünya İklim Araştırma Programı (WCRP), Beşinci Değerlendirme Raporu'nun (AR5) zaman çizelgesi ve sonrasında dünyanın tüm karasal bölgeleri için iyileştirilmiş bölgesel iklim değişikliği projeksiyonları üretmek üzere Koordineli Bölgesel İklim Küçültme Deneyi (CORDEX) girişimini oluşturmuştur. EURO-CORDEX, Birleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi Aşama 5'ten (CMIP5) çok sayıda küresel iklim modelinin birden çok dinamik ve ampirik-istatistiksel küçültme modellerine dayalı toplu iklim simülasyonları üreten CORDEX girişiminin Avrupa koludur. EURO-CORDEX bölgesel iklim modeli (RCM) simülasyonları, 0,44 derecelik genel CORDEX çözünürlüğü (EUR-44, ~50 km) ve 0,11 derecelik daha hassas çözünürlük (EUR-11, ~12,5km) olmak üzere iki farklı uzamsal çözünürlükte gerçekleştirilmektedir (The Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – Europe [EURO-CORDEX], 2023). EURO-CORDEX model kapsam alanı Şekil 3.16'da gösterilmektedir.



Şekil 3.16. EURO-CORDEX model kapsam alanı (CORDEX, 2023).

3.4.2. EC-Earth2 modeli

EC-Earth (A European community Earth System Model) versiyon 2, ulusal meteorolojik hizmetler ve araştırma enstitülerinden oluşan Avrupa Konsorsiyumu tarafından geliştirilen ve Avrupa Orta Menzilli Hava Tahminleri Merkezi'nin (ECMWF) entegre tahmin sistemine (IFS) dayanan bir küresel iklim modeli (GCM)'dir (A European community Earth System Model [EC-Earth], 2023). Birleştirilmiş model, atmosfer, kara yüzeyi, okyanus ve deniz buzulu bileşenlerinden oluşmaktadır. Atmosfer modeli, ECMWF Entegre Tahmin Sistemi (IFS) CY31R1'e dayanmaktadır. Standart yapılandırma, 62 dikey katman ve T159 (~125 km) yatay spektral çözünürlükte çalışmaktadır. Kara yüzeyi bileşeni olarak, IFS CY31R1'deki TESSEL (Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land) şemasının hidrolojinin geliştirilmiş bir temsilini kullanan H-TESSSEL versiyonu

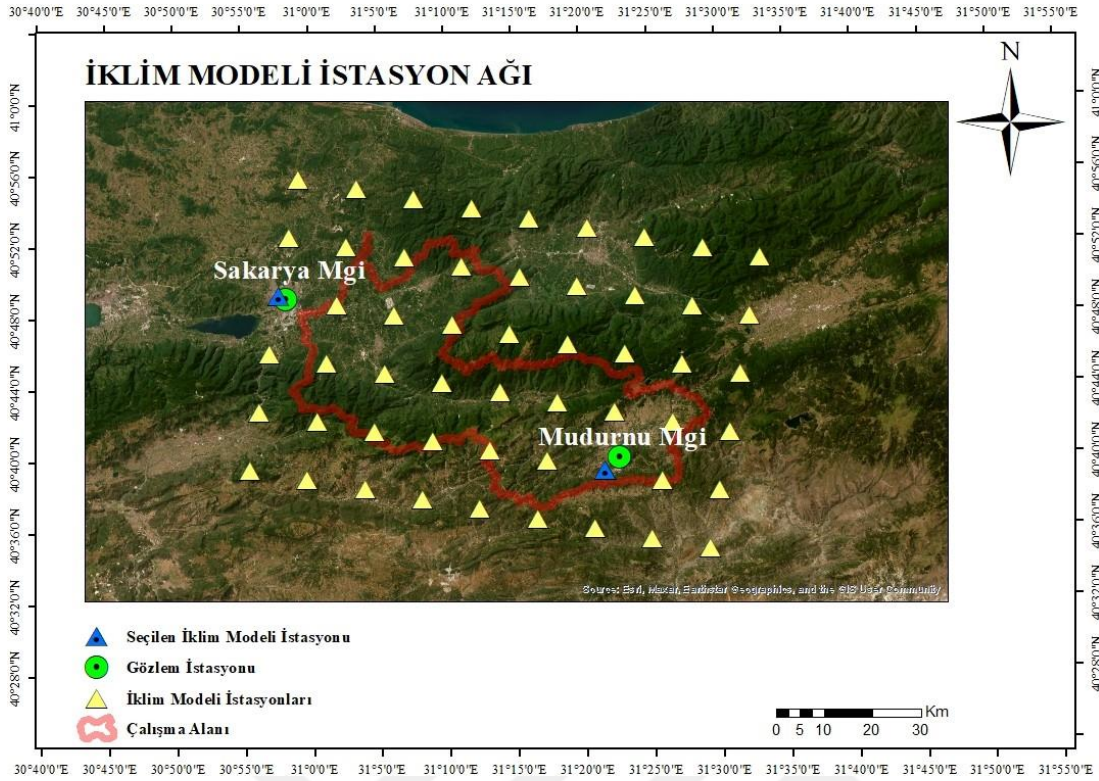
kullanılmaktadır. EC-Earth2 modeli, Pierre Simon Laplace Enstitüsü (IPSL) tarafından geliştirilen Océan Parallélisé v9 (OPA9) okyanus genel dolaşım modeli ve dinamik-termodinamik bir deniz buzı modeli olan Louvain-la-Neuve v2 (LIM2)'den oluşan, nominal olarak 1 derecelik yatay çözünürlüğe ve 42 dikey katmana sahip Nucleus for European Modeling of the Ocean v2 (NEMO2) okyanus modelini içermektedir. Okyanus/buzul modeli, Ocean Atmosphere Sea Ice Soil v3 (OASIS3) kuplörü aracılığıyla atmosfer/kara modeliyle birleştirilmektedir (Hazeleger ve ark., 2010; Hazeleger ve ark., 2012).

CORDEX projesi kapsamında İsveç Meteoroloji ve Hidroloji Enstitüsü (SMHI) tarafından geliştirilmiş olan Rossby Center Bölgesel Atmosfer Modeli v4 (RCA4) bölgesel iklim modeli (RCM) kullanılarak dinamik ölçek küçültme yapılmış olan EC-Earth2 model verileri, Avrupa Birliği uzay programının dünya gözlem bileşeni olan Copernicus'taki iklim değişikliği servisi (Copernicus Climate Change Service)'nden açık kaynak olarak temin edilmiştir. İklim modeli bilgileri Tablo 3.8'de gösterilmektedir.

Tablo 3.8. Çalışmada kullanılan iklim modeli bilgileri.

Veritabanı	GCM	RCM	Senaryolar	Çözünürlük	Tarihsel Veri Zaman Periyodu	Projeskiyon Veri Zaman Periyodu
CORDEX	EC-Earth2	SMHI-RCA4	RCP4.5 RCP8.5	0.11° - 12.5 km	1951 - 2005	2006 - 2100

Çalışmada kullanılacak iklim modeli veri istasyonları olarak, EC-Earth2 iklim modelinin havza sınırlarını kapsayan veri istasyon ağı içerisinde, yanlışlık (bias) düzeltme işleminde referans olarak kullanılan Sakarya ve Mudurnu MGI'lere en yakın iklim modeli istasyonları seçilmiştir. Bu istasyonlardan alınan ham veriler yanlışlık (bias) düzeltme işlemine tabi tutulmuştur. EC-Earth2 iklim modeli veri istasyon ağı ve seçilen veri istasyonları Şekil 3.17'de gösterilmektedir.



Şekil 3.17. EC-Earth2 iklim modeli veri istasyon ağı ve seçilen istasyonlar.

3.4.3. Yanlılık (bias) düzeltme yöntemleri

Hem Küresel hem de Bölgesel İklim modellerinin (GCM, RCM) çıktılarında sistematik hatalar (yanlılıklar) bulunmaktadır. Örneğin, iklim modelleri genellikle çok fazla yağmurlu güne sahiptir ve aşırı yağışları hafife alma eğilimindedir. İklim modellerindeki hatalara bir dizi faktör neden olabilmektedir. Hatalar veya yanlılıklar, sınırlı uzamsal çözünürlükten (büyük grid boyutları), basitleştirilmiş termodinamik işlemler ve fizikten veya küresel iklim sisteminin eksik anlaşılmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle, etki modellerinde veya iklim etki değerlendirmelerinde düzeltilmemiş çıktıların kullanılması genellikle gerçekçi olmayan sonuçlar verebilmektedir. İklim modellerindeki büyük yanlılıkların üstesinden gelmek için bir dizi yanlılık düzeltme yöntemi geliştirilmiştir. Tüm yöntemler için, gözlemsel veri setlerinin kalitesinin yanlılık düzeltmesinin kalitesini belirlediğini anlamak önemlidir. İyi bir önyargı düzeltmesi yapmak için, iyi bir gözlem veri setine sahip olmak önemlidir (Copernicus, 2023).

Yanlılık (bias) düzeltme prosedürleri, günlük bir zaman adımında gözlemlenen ve simüle edilen iklim değişkenleri arasındaki tutarsızlığı en aza indirmek için kullanılmaktadır. Böylece düzeltilmiş simüle edilmiş iklim verileri tarafından yürütülen hidrolojik simülasyonlar, gözlemlenen iklim verilerini kullanan

simülasyonlarla oldukça iyi bir şekilde eşleşir. Bu çalışmada küresel ve bölgesel iklim modellerinden elde edilen verileri ayıklamak ve yanlılık (bias) düzeltmek için geliştirilmiş olan CMhyd (Climate Model data for hydrologic modeling) programı kullanılmıştır. Yanlılık (bias) düzeltme yöntemlerinin durağan olduğu varsayılır, yani düzeltme algoritması ve onun mevcut iklim koşulları için parametreleştirilmesinin gelecekteki koşullar için de geçerli olduğu varsayılmaktadır. Böylece, aynı düzeltme algoritması gelecekteki iklim verilerine uygulanmaktadır. Bununla birlikte, bir yanlılık düzeltme yönteminin, parametrelendirme için kullanılanlardan farklı koşullar için ne kadar iyi performans gösterdiği bilinmemektedir. Değerlendirme döneminde iyi bir performans, değişen gelecek koşullarında iyi bir performansı garanti etmemektedir. Ancak mevcut koşullar için iyi performans gösteren bir yöntemin değişen koşullar için mevcut koşullar için zaten düşük performans gösteren bir yöntemden daha iyi performans göstermesi muhtemeldir (Teutschbein ve Seibert, 2012).

3.4.3.1. Yağış ve sıcaklık doğrusal ölçeklendirmesi (LS)

Doğrusal ölçeklendirme yaklaşımı (Lenderink ve ark. (2007)), gözlemlenen ve günümüzün simüle edilmiş değerleri arasındaki farklara dayalı aylık düzeltme değerleri ile çalışmaktadır. Tanım olarak, düzeltilmiş RCM simülasyonları, aylık ortalama değerleri açısından gözlemlerle tam bir uyum içinde olacaktır. Yağış, uzun vadeli aylık ortalama gözlemlenen ve kontrol çalışması verilerinin oranına dayalı bir faktörle düzeltilmekte olup bu işlem denklem 3.16 ve 3.17’de gösterilmiştir.

$$P^*_{kontrol}(g) = P_{kontrol}(g) \cdot \left[\frac{\mu_a(P_{gözlem}(g))}{\mu_a(P_{kontrol}(g))} \right] \quad (3.16)$$

$$P^*_{senaryo}(g) = P_{senaryo}(g) \cdot \left[\frac{\mu_a(P_{gözlem}(g))}{\mu_a(P_{kontrol}(g))} \right] \quad (3.17)$$

Burada P yağışı, (g) günlük verileri, μ ortalamayı, a ayı ve P^* son düzeltme adımını gösterir.

Sıcaklık, uzun dönemli aylık ortalama gözlenen ve kontrol çalışması verilerinin farkına dayalı olarak bir ek terim yardımıyla düzeltilmektedir. Uygulanan düzeltme katsayılarının ve eklerinin gelecekteki koşullar için de değişmeden kalacağı varsayılmaktadır. Denklem 3.18 ve 3.19’da bu bağıntılar gösterilmektedir.

$$T^*_{kontrol}(g) = T_{kontrol}(g) + \mu_a(T_{gözlem}(g)) - \mu_a(T_{kontrol}(g)) \quad (3.18)$$

$$T^*_{senaryo}(g) = T_{senaryo}(g) + \mu_a(T_{gözlem}(g)) - \mu_a(T_{kontrol}(g)) \quad (3.19)$$

Burada T sıcaklığı, (g) günlük verileri, μ ortalamayı, a ayı ve T^* son düzeltme adımını göstermektedir (Teutschbein ve Seibert, 2012).

3.4.3.2. Yağış yerel yoğunluk ölçeklendirmesi (LOCI)

Doğrusal ölçeklendirme, ortalamada bir sapmayı hesaba katarken, yağışlı gün frekansını ve yoğunluğundaki yanlışlıkları düzeltmemektedir. Schmidli ve ark. (2006) tarafından sunulan yerel yoğunluk ölçeklendirmesi (LOCI) doğrusal ölçeklendirmeyi bir adım daha ileri götürmekte, hem ortalamayı hem de yağış zaman serilerinin yağışlı gün frekanslarını ve yağışlı gün yağış yoğunluklarını üç adımda ayrı ayrı ayarlamaktadır.

İlk olarak, RCM'ye özgü bir yağış eşiği ($P_{th,kontrol}$), bu eşiği aşan RCM ile simüle edilmiş günlerin sayısı, 0 mm'den büyük yağışlı gözlemlenen günlerin sayısı ile eşleşecek şekilde kalibre edilmektedir. Ardından, hem kontrol hem de senaryo çalıştırması için yağış olaylarının sayısı, kalibre edilmiş RCM yağış eşiği ($P_{th,kontrol}$) uygulanarak düzeltilmektedir. Böylece ($P_{th,kontrol}$)'den düşük yağışlı tüm günler, 0 mm yağışlı kuru günlere yeniden tanımlanmaktadır. Bu işlem denklem 3.20 ve 3.21'de gösterilmektedir.

$$P^{*1}_{kontrol}(g) = \begin{cases} 0, & P_{kontrol}(g) < P_{th,kontrol} \\ P_{kontrol}(g), & \text{bunun dışında} \end{cases} \quad (3.20)$$

$$P^{*1}_{senaryo}(g) = \begin{cases} 0, & P_{senaryo}(g) < P_{th,kontrol} \\ P_{senaryo}(g), & \text{bunun dışında} \end{cases} \quad (3.21)$$

İkinci adımda, uzun vadeli aylık ortalama yağışlı gün yoğunluklarına dayalı olarak doğrusal bir ölçekleme faktörü tahmin edilmektedir. Yalnızca yağışlı günleri hesaba katarak (yani, 0 mm'den büyük yağışlı gözlemlenen günler ve ayarlanan yağış eşiğinden ($P_{th,kontrol}$) daha büyük yağışlı RCM ile simüle edilmiş günler), yoğunluk ölçekleme faktörü (S) denklem 3.22'deki şekilde hesaplanır.

$$S = \frac{\mu_a(P_{gözlem}(g) \mid P_{gözlem}(g) > 0 \text{ mm})}{\mu_a(P_{kontrol}(g) \mid P_{kontrol}(g) > P_{th, kontrol}) - P_{th, kontrol}} \quad (3.22)$$

Son olarak kontrol yağış verisi ve RCM ile simüle edilmiş yağış verisi denklem 3.23 ve 3.24'deki gibi düzeltilmektedir.

$$P^*_{kontrol}(g) = P^{*1}_{kontrol}(g) \times S \quad (3.23)$$

$$P^*_{senaryo}(g) = P^{*1}_{senaryo}(g) \times S \quad (3.24)$$

Burada P yağışı, (g) günlük verileri, μ ortalamayı, a ayı ifade etmektedir. T sıcaklığı, (g) günlük verileri, μ ortalamayı, a ayı, P^{*1} ve T^{*1} ara adımı göstermektedir. S yoğunluk ölçekleme faktörüdür. P^* ve T^* yağış ve sıcaklık için son düzeltme adımını göstermektedir. Tanım gereği, ayarlanmış kontrol ve senaryo yağışı, gözlemlenen zaman serileriyle aynı ortalamaya, yağışlı gün sıklığına ve yoğunluğa sahiptir (Teutschbein ve Seibert, 2012).

3.4.3.3. Yağış güç dönüşümü (PT)

Doğrusal ölçekleme, ortalamadaki bir yanlılığı açıklarken, varyanstaki farklılıkların düzeltilmesine izin vermemektedir. Bu nedenle, üstel formdaki doğrusal olmayan bir düzeltme (a^*P^b), bir yağış zaman serisinin varyans istatistiklerini özel olarak ayarlamak için kullanılabilmektedir (Leander ve Buishand, 2007; Leander ve ark., 2008).

Parametre b , ara merkezli 90 günlük bir kesit kullanılarak aylık bazda dağılımdan bağımsız bir yaklaşımla tahmin edilmektedir. İlk olarak b , düzeltilmiş günlük RCM yağışının (P^b) varyasyon katsayısının (CV), her a ayı için gözlenen günlük yağışın ($P_{gözlem}$) CV 'si ile eşleştirilmesiyle belirlenmektedir. b_a denklem 3.25'teki şekilde bulunur.

$$\begin{aligned} f(b_a) = 0 &= CV_a(P_{gözlem}(g)) - CV_a(P^{b_a}_{kontrol}(g)) \\ &= \frac{\sigma_a(P_{gözlem}(g))}{\mu_a(P_{gözlem}(g))} - \frac{\sigma_a(P^{b_a}_{kontrol}(g))}{\mu_a(P^{b_a}_{kontrol}(g))} \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$P^{*1}_{kontrol}(g) = P^{b_a}_{kontrol}(g) \quad (3.26)$$

$$P^{*1}_{senaryo}(g) = P^{b_a}_{senaryo}(g) \quad (3.27)$$

Bu işlem kök bulma tekniği ile yapılmaktadır. Daha sonra, gözlemlenen yağışın uzun vadeli aylık ortalaması, (LS) standart doğrusal ölçeklendirme parametresi kullanılarak $P^{*1}_{kontrol}(g)$ ara serisinin aylık ortalaması ile eşleştirilmektedir. Bu işlem denklem 3.26 ve 3.27'de gösterilmektedir. Böylelikle düzeltilmiş kontrol ve senaryo yağışları denklem 3.28 ve 3.29 ile hesaplanır.

$$P^*_{kontrol}(g) = P^{*1}_{kontrol}(g) \cdot \left[\frac{\mu_a(P_{gözlem}(g))}{\mu_a(P^{*1}_{kontrol}(g))} \right] \quad (3.28)$$

$$P^*_{senaryo}(g) = P^{*1}_{senaryo}(g) \cdot \left[\frac{\mu_a(P_{gözlem}(g))}{\mu_a(P^{*1}_{kontrol}(g))} \right] \quad (3.29)$$

Burada P yağışı, (g) günlük verileri, μ ortalamayı, a ayı, P^{*1} ve T^{*1} ara adımı ifade etmektedir. P^* yağış için son düzeltme adımını göstermektedir (Teutschbein ve Seibert, 2012).

3.4.3.4. Sıcaklık varyans ölçeklendirmesi (VS)

Güç dönüşümü yöntemi, hem ortalamayı hem de varyansı düzeltmek için etkili bir yöntemdir, ancak bir güç fonksiyonunun kullanılması nedeniyle yağış zaman serileriyle sınırlıdır. Sıcaklık zaman serisinin hem ortalamasını hem de varyansını düzeltmek için Chen ve ark. (2011a; 2011b) tarafından varyans ölçeklendirme şeklinde bir yaklaşım geliştirilmiştir. İlk adımda, RCM-simüle edilmiş zaman serilerinin ortalamaları (μ_a) doğrusal ölçeklendirme (LS) ile ayarlanmaktadır. Bundan sonra, ortalama düzeltilmiş kontrol ($T^{*1}_{kontrol}(g)$) ve senaryo çalıştırmaları ($T^{*1}_{senaryo}(g)$) denklem 3.30 ve 3.31 ile aylık bazda sıfır ortalamaaya kaydırılmaktadır.

$$T^{*2}_{kontrol}(g) = T^{*1}_{kontrol}(g) - \mu_a(T^{*1}_{kontrol}(g)) \quad (3.30)$$

$$T^{*2}_{senaryo}(g) = T^{*1}_{senaryo}(g) - \mu_a \left(T^{*1}_{senaryo}(g) \right) \quad (3.31)$$

Ardından, standart sapmalar (kaydırılan zaman serisinin σ 'sı) gözlemlenen σ ve kontrol çalıştırması σ oranına göre denklem 3.32 ve 3.33'teki gibi ölçeklendirilmektedir.

$$T^{*3}_{kontrol}(g) = T^{*2}_{kontrol}(g) \cdot \left[\frac{\sigma_a \left(T_{gözlem}(g) \right)}{\sigma_a \left(T^{*2}_{kontrol}(g) \right)} \right] \quad (3.32)$$

$$T^{*3}_{senaryo}(g) = T^{*2}_{senaryo}(g) \cdot \left[\frac{\sigma_a \left(T_{gözlem}(g) \right)}{\sigma_a \left(T^{*2}_{kontrol}(g) \right)} \right] \quad (3.33)$$

Son olarak, standart sapması düzeltilmiş zaman serileri ve birinci adımın düzeltilmiş ortalaması ($\mu_a T^{*1}_{kontrol}(g)$ ve $\mu_a T^{*1}_{senaryo}(g)$) toplanarak düzeltilmiş kontrol ve senaryo yağışları denklem 3.34 ve 3.35 ile hesaplanmaktadır.

$$T^*_{kontrol}(g) = T^{*3}_{kontrol}(g) + \mu_a \left(T^{*1}_{kontrol}(g) \right) \quad (3.34)$$

$$T^*_{senaryo}(g) = T^{*3}_{senaryo}(g) + \mu_a \left(T^{*1}_{senaryo}(g) \right) \quad (3.35)$$

Burada T sıcaklığı, (g) günlük verileri, μ ortalamayı, σ standart sapmayı, a ayı, T^{*1} , T^{*2} ve T^{*3} ara adımı ifade etmektedir. T^* sıcaklık için son düzeltme adımını göstermektedir. Tanımı gereği bu yaklaşım, düzeltilmiş RCM kontrol çalışmasının gözlemlenen zaman serileriyle aynı ortalamaya ve standart sapmaya (yani varyansa) sahip olduğunu kabul etmektedir (Teutschbein ve Seibert, 2012).

3.4.3.5. Yağış ve sıcaklık dağılım haritalaması (DM)

Dağılım haritalaması yaklaşımı, RCM ile simüle edilmiş iklim değerlerinin dağılım fonksiyonunu, gözlemlenen dağılım fonksiyonu ile uyuşacak şekilde düzeltmektir. Bu, yağış ve sıcaklığın oluşum dağılımlarını değiştirmek için bir transfer fonksiyonu oluşturarak yapılabilmektedir (Sennikovs ve Bethers, 2009). Şekil parametresi α ve ölçek parametresi β ile Gama dağılımının (Thom (1958)) genellikle yağış olaylarının

dağılımları için uygun olduğu varsayılmaktadır. Bu bağıntı denklem 3.36'da gösterilmektedir.

$$f_y(x | \alpha, \beta) = x^{\alpha-1} \cdot \frac{1}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)} \cdot e^{-\frac{x}{\beta}}; x \geq 0; \alpha, \beta > 0 \quad (3.36)$$

α şekil parametresi dağılımın profilini kontrol etmektedir. (1) $\alpha < 1$, her iki ekseninde de asimptotik olan üstel şekilli bir Gama dağılımını göstermekte, (2) $\alpha = 1$ özel bir durum olup üstel bir dağılımı karakterize etmekte ve (3) $\alpha > 1$, çarpık bir tek modlu dağılım eğrisini şekillendirmektedir. Ölçek parametresi β , Gama dağılımının dağılmasını belirlemektedir. Daha küçük bir β , daha sıkıştırılmış bir dağılıma yol açmakta ve bu nedenle, ekstrem olayların daha düşük olasılıklarına yol açmaktadır. Öte yandan, daha büyük bir β , aşırı olayların daha yüksek olasılıklarını ifade eden gergin bir dağılıma neden olmaktadır.

Sıcaklık zaman serileri için, konum parametresi μ ve ölçek parametresi σ ile Gauss dağılımının (Cramér (1999)) genellikle en uygun olduğu varsayılmaktadır (Thom, 1952, 1954). Bu bağıntı denklem 3.37'de gösterilmektedir.

$$f_N(x | \mu, \sigma^2) = x^{\alpha-1} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}; x \in \Re \quad (3.37)$$

Ölçek parametresi σ , standart sapmayı, yani Gauss dağılımının aralığının ne kadar esnetildiğini veya sıkıştırıldığını belirlemektedir. σ için daha küçük bir değer, uç değer olasılıklarının daha düşük olduğu daha sıkıştırılmış bir dağılımla sonuçlanmaktadır. Tersine, σ için daha büyük bir değer, uç değerlerin daha yüksek olasılıkları olan uzatılmış bir şekli göstermektedir. Lokasyon parametresi μ doğrudan ortalamayı ve dolayısıyla dağılımın lokasyonunu kontrol etmektedir (Teutschbein ve Seibert, 2012).

4. SONUÇLAR

4.1. Model Kalibrasyon ve Validasyon Sonuçları

Havzaya ait girdi verileri kullanılarak hidrolojik modelin oluşturulması sonrasında iklim verilerinin de modele girilmesi ile modeli analiz aşamasına gelinmiştir. Model çalışma periyodu olarak 1978-1995 arası 18 yıl süre belirlenmiştir. Modelin başlangıç koşullarını oluşturması ve çıktı doğruluğunu arttırmak için “ısınma periyodu” olarak 3 yıl belirlenmiştir. Böylece model ilk 3 yıl çalışacak ancak çıktı alınmayacaktır. Model aylık zaman periyodunda çalıştırılarak temel akım sonuçları elde edilmiştir. Bu akım sonuçları AGİ gözlem verileri ile karşılaştırıldığında yeterli uyumun olmadığı görülmüştür. Bu uyumun iyileştirilmesi amacıyla kalibrasyon ve validasyon işlemi yapılmıştır. Yağışlı ve kurak dönemleri içerecek şekilde 1981-1990 arası 10 yıl kalibrasyon, 1991-1995 arası 5 yıl validasyon periyodu olarak belirlenmiştir.

Mudurnu Çayı havzasının Adapazarı ovası kesimi 30 m kotlarında bulunurken güneyde Elmacık ve Samanlı dağ sıralarında 1700 m yükseltilerine çıkmaktadır. Havzada bulunan MGİ’lerin kotlarının dağlık kesimlere nazaran düşük olmasından dolayı, yüksek kesimlerdeki yağış ve sıcaklık durumlarını tam olarak yansıtamadığı tespit edilmiştir. Yükselti şeritleri (elevation band) tanımlanmadan kurulan modelde özellikle kar erimesinin yaşandığı Mart-Mayıs arasında model ve gözlem verileri arasında sapma olduğu görülmüştür. Bu nedenle model yükselti şeritleri (elevation band) tanımlanarak kurulmuş ve dağlık kesimlerdeki orografik yağışlar ve sıcaklık düşümleri modele tanıtılmıştır. MGİ verilerine göre yüksek kesimlerde yaşanan yağış ve sıcaklık sapmalarını tespit edebilmek için kalibrasyonun ilk adımı olarak TLAPS ve PLAPS parametreleri kalibre edilmiş olup sonuçlar Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. TLAPS ve PLAPS kalibrasyon sonuçları.

Parametre	Açıklama	Değişiklik Türü	Sınır Değerler		Başlangıç Değerleri		Uygun Değer		
			min	max	min	max	Dokurcun	Gebeş	Yağbasan
TLAPS	Yağış sapma oranı (mm/km)	v	-1000	1000	0	500	200	400	500
PLAPS	Sıcaklık sapma oranı (°C/km)	v	-10	10	0	-10	-10	-10	-10

v: değiştirme, r: çarpma

Havzanın memba kesimleri iklim ve bitki örtüsü olarak İç Anadolu ile bir geçiş kesiminde olması ve Mudurnu MGİ yıllık ortalama yağış miktarının 550 mm civarında olması itibarıyla Dokurcun AGİ alt havzası için PLAPS değeri 200 mm/km değeri bulunmuştur. Buna nazaran havzanın mansap kesiminde yıllık yağışın 850 mm civarında olmasına da uygun şekilde Gebeş AGİ alt havzası için PLAPS değeri 400 mm/km olarak, Yağbasan AGİ alt havzasında ise 500 mm/km olarak bulunmuştur.

Sisteme su veren önemli kaynaklardan olan kar erimesi sürecini kontrol eden parametreler olan (SFTMP, SMTMP, SMFMX, SMFMN ve TIMP) parametrelerinin de kendi kapsamında ayrıca kalibre edilmesi ve diğer parametrelere daha sonra geçilmesi gereklidir. Bunun sebebi bu parametrelerde yapılan değişikliklerin diğer süreçleri kontrol eden parametre sonuçlarına etkisinin olmasıdır. Bu nedenlerle kar erimesi parametreleri de ayrıca kalibre edilmiş olup sonuçlar Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Kar erime parametreleri kalibrasyon sonuçları.

Parametre	Açıklama	Değişiklik Türü	Sınır Değerler		Başlangıç Değerleri		Uygun Değer
			min	max	min	max	
SFTMP	Kar yağışı sıcaklığı (°C).	v	-20	20	-5	5	-2,07
SMTMP	Kar erime taban sıcaklığı (°C).	v	-20	20	-5	5	-2,09
SMFMX	21 Haziran'daki kar erime faktörü (mm/°C-gün).	v	0	20	0	10	9,03
SMFMN	21 Aralık'taki kar erime faktörü (mm/°C-gün).	v	0	20	0	10	0,41
TIMP	Kar kütlesi sıcaklığı gecikme faktörü.	v	0	1	0	1	0,06

v: değiştirme, r: çarpma

Ön parametreler belirlenip sabitlendikten sonra diğer hidrolojik süreçleri temsil eden parametrelerin kalibrasyon işlemine geçilmiştir. SWAT içerisinde birçok parametre bulunması ve bu parametrelerin her birinin akım sonuçlarına etkisinin farklı olması nedeniyle hassasiyet analizi yapılmıştır. Tekil hassasiyet analizi (one at a time) yaklaşımı kullanılarak, diğer parametreler sabit kalmak koşuluyla ilgili parametre sınır değerleri içerisinde değiştirilerek sonuçların değişim hassasiyeti gözlenmiştir. 21 parametre üzerinde yapılan hassasiyet analizi sonucuna göre sıralama Tablo 4.3’te gösterilmektedir. Bu yöntem ile akım sonuçları üzerinde etkili olan parametreler belirlenmiş ve bu parametreler kalibrasyona tabi tutulmuştur. Sırasıyla hassasiyeti

yüksek parametrelerin CN2, GW_DELAY, GWQMN, SOL_Z, SOL_BD ve RCHRG_DP olduğu görülmüştür.

Tablo 4.3. Parametre hassasiyet analizi sonuçları.

Parametre Adı	Değişiklik Türü	Sınır Değerler		Sıralama
		min	max	
CN2.mgt	Çarpma	-0,5	0,5	1
GW_DELAY.gw	Değiştirme	0	500	2
GWQMN.gw	Değiştirme	0	5000	3
SOL_Z.sol	Çarpma	-0,5	0,5	4
SOL_BD.sol	Çarpma	-0,5	0,5	5
RCHRG_DP.gw	Değiştirme	0	1	6
ALPHA_BF.gw	Değiştirme	0	1	7
GW_REVAP.gw	Değiştirme	0,02	0,2	8
LAT_TTIME.hru	Değiştirme	0	180	9
SOL_K.sol	Çarpma	-0,5	0,5	10
SOL_AWC.sol	Çarpma	-0,5	0,5	11
OV_N.hru	Değiştirme	0,01	30	12
ESCO.hru	Değiştirme	0	1	13
EPCO.hru	Değiştirme	0	1	14
SURLAG.bsn	Değiştirme	1	24	15
SHALLST.gw	Değiştirme	0	5000	16
REVAPMN.gw	Değiştirme	0	500	17
SLSUBBSN.hru	Değiştirme	10	150	18
HRU_SLP.hru	Çarpma	-0,3	0,3	19
CH_N1.sub	Değiştirme	0,01	0,3	20
CH_N2.rte	Değiştirme	0,01	0,3	21

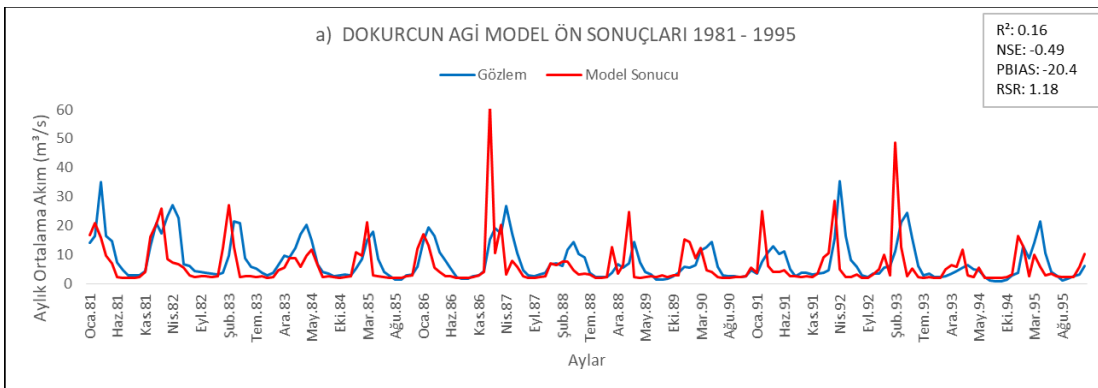
Belirlenen 6 parametre üzerinden havzada bulunan 3 adet AGİ'nin kapsadığı alt havzalar ayrı ayrı kalibre edilmiştir. İkinci bir işlem olarak Gebeş AGİ kapsam olarak Dokurcun AGİ alanını da içine aldığından Gebeş AGİ'nin kapsadığı Dokurcun AGİ kalibrasyon parametre değerleri sabitlenmek suretiyle geriye kalan alt havzalar Gebeş AGİ'ye göre kalibrasyona tabi tutulmuştur. Yapılan bu işlem neticesinde doğrudan Gebeş AGİ'ye göre yapılan kalibrasyon sonuçlarının daha iyi olduğu görülmüş olup sonuçlarda bu kalibrasyon işlemi dikkate alınmıştır. Kalibrasyon sonucu bulunan parametre değerleri Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.4. Parametre kalibrasyon değerleri.

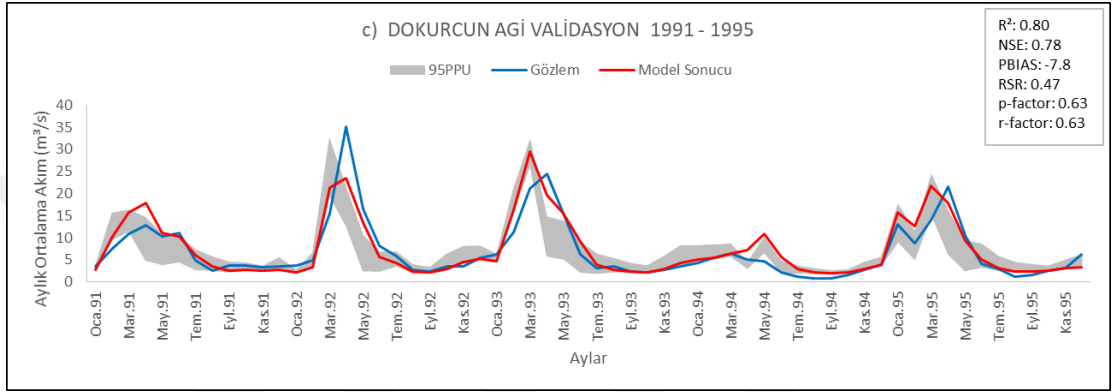
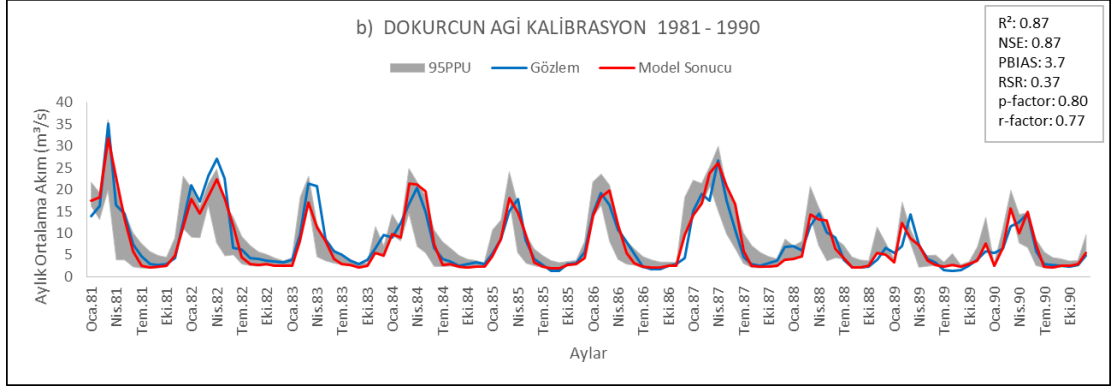
Parametre	Açıklama	Değişiklik Türü	Sınır Değerler		Başlangıç Değerleri		Uygun Değer		
			min	max	min	max	Dokurcun	Gebeş	Yağbasan
CN2	Nem durumu II için ilk SCS akış eğrisi numarası.	r	35	98	-0,1	0,1	-0,094	-0,093	0,092
GW_DELAY	Yeraltı suyu gecikme süresi (gün).	v	0	500	0	100	15,25	9,25	0,25
GWQMN	Sığ akiferde geri akışın oluşması için gerekli olan eşik su derinliği (mm).	v	0	5000	0	2000	1045	315	505
SOL_Z	Toprak yüzeyinden tabakanın dibine kadar olan derinlik (mm).	r	0	3500	-0,1	0,1	0,013	-0,035	-0,089
SOL_BD	Nemli kütle yoğunluğu (mg/m ³ veya g/cm ³).	r	0,9	2,5	-0,1	0,1	-0,044	0,069	0,036
RCHRG_DP	Derin akifer süzülme oranı.	v	0	1	0	0,1	0,076	0,095	0,005

v: değiştirme, r: çarpma

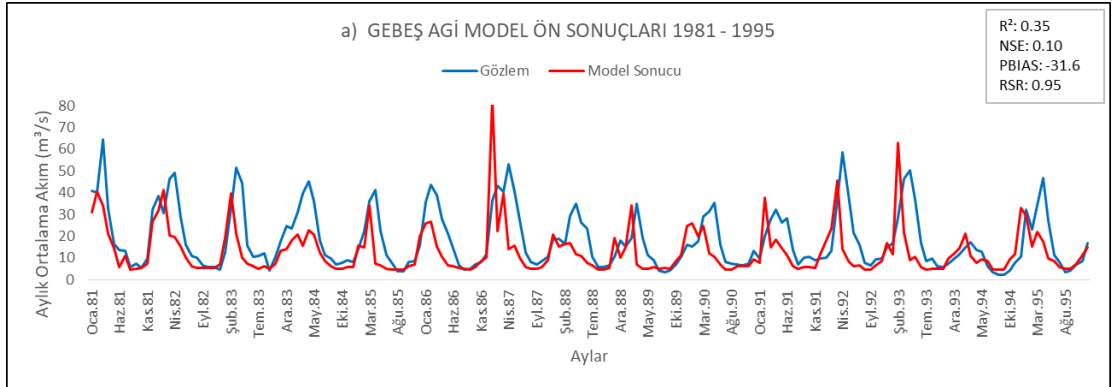
Kalibrasyon parametre değerleri incelendiğinde gözlem verileri ile en iyi uyumu gösteren akım verilerini sağlayan model parametrelerinin model girdi verilerinin özgün parametre değerlerinin dar bir aralıkta değiştirilmesi ile elde edildiği görülmüştür. Bu durum hidrolojik modelin girdi verilerinin havza karakteristiklerini yansıtmada başarılı olduğunu göstermektedir. Kalibrasyon ve validasyon işlemlerinin yapıldığı Dokurcun, Gebeş ve Yağbasan AGİ'leri için gözlem verileri ile model ön sonuçları, kalibrasyon ve validasyon yapılmış model sonuçlarının gösterildiği grafikler Şekil 4.1 - Şekil 4.3'te yer almaktadır.



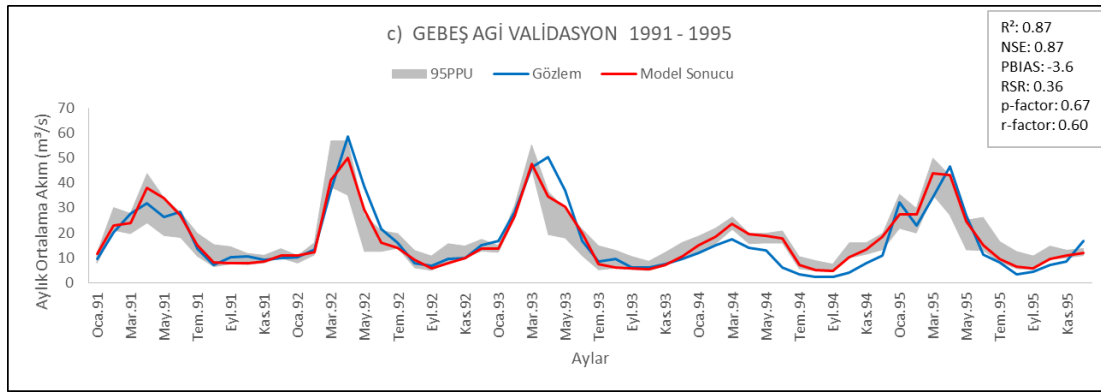
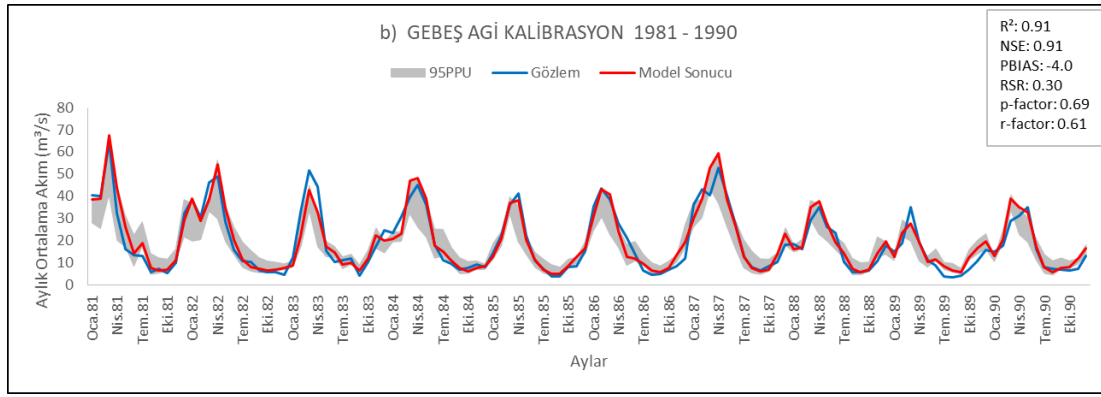
Şekil 4.1. Dokurcun AGİ için a) 1981-1995 periyodu model ön sonuçları, b) 1981-1990 periyodu model kalibrasyon sonucu, c) 1991-1995 periyodu model validasyon sonucu.



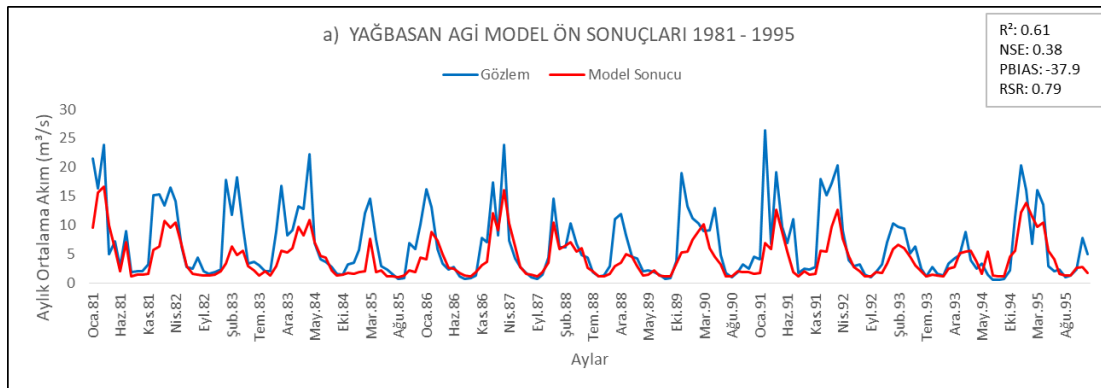
Şekil 4.1. (Devamı) Dokurcun AĞI için a) 1981-1995 periyodu model ön sonuçları, b) 1981-1990 periyodu model kalibrasyon sonucu, c) 1991-1995 periyodu model validasyon sonucu.



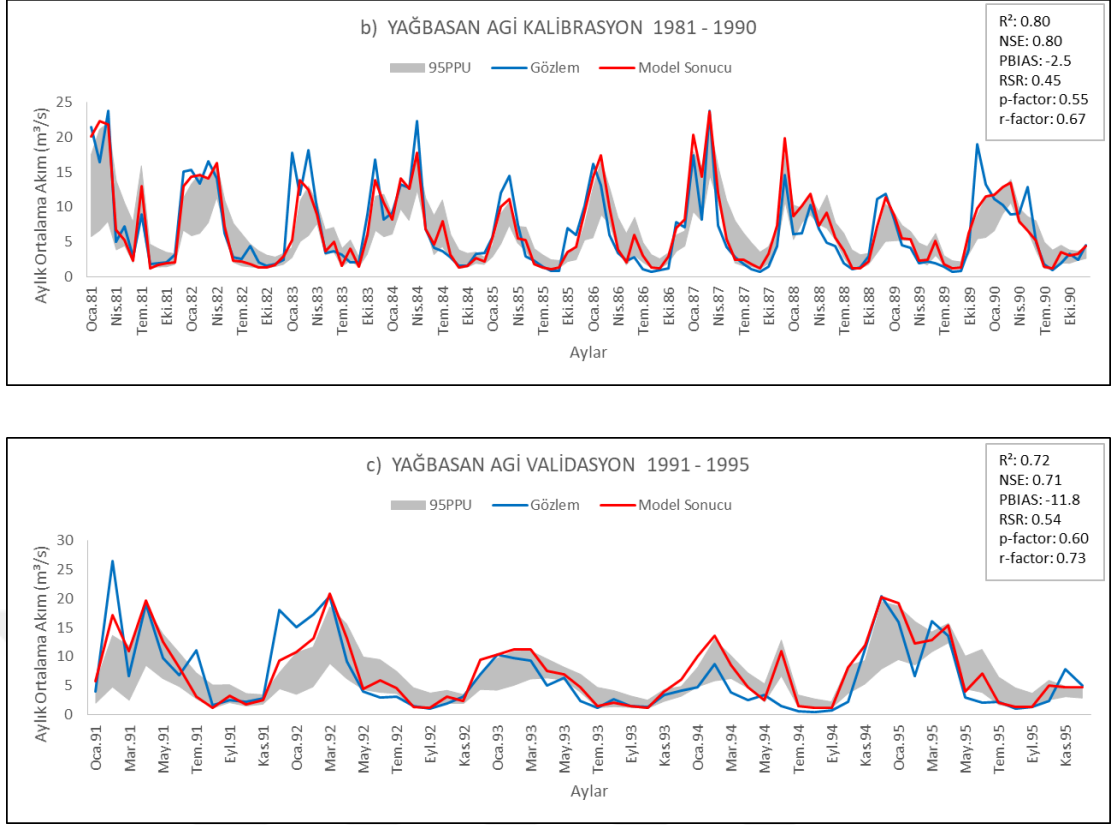
Şekil 4.2. Gebeş AĞI için a) 1981-1995 periyodu model ön sonuçları, b) 1981-1990 periyodu model kalibrasyon sonucu, c) 1991-1995 periyodu model validasyon sonucu.



Şekil 4.2. (Devamı) Gebeş AĞI için a) 1981-1995 periyodu model ön sonuçları, b) 1981-1990 periyodu model kalibrasyon sonucu, c) 1991-1995 periyodu model validasyon sonucu.



Şekil 4.3. Yağbasan AĞI için a) 1981-1995 periyodu model ön sonuçları, b) 1981-1990 periyodu model kalibrasyon sonucu, c) 1991-1995 periyodu model validasyon sonucu.



Şekil 4.3. (Devamı) Yağbasan AGİ için a) 1981-1995 periyodu model ön sonuçları, b) 1981-1990 periyodu model kalibrasyon sonucu, c) 1991-1995 periyodu model validasyon sonucu.

Şekil 4.1'deki Dokurcun AGİ model ön sonuçları incelendiğinde model akımlarının gözlem verisi baz akım değerleri ile uyum gösterdiği ancak pik akım değerlerini yakalayamadığı görülmüştür. Ayrıca model akımlarının bahar aylarındaki gözlem akımlarından daha düşük olduğu görülmüştür. Yapılan kalibrasyon işlemleri neticesinde model akımlarının gözlem verisi baz akımları ile uyum göstermekle birlikte pik akımların ve bahar aylarındaki akımların da iyileşerek gözlem verisi ile uyum sağladığı görülmüştür. Şekil 4.2'deki Gebeş AGİ model ön sonuçları Dokurcun AGİ'ye benzer şekilde baz akım değerlerini yakalamakla birlikte pik akımlar ve bahar ayları akımları ile uyum göstermemiştir. Kalibrasyon neticesinde ise modelin baz, pik ve bahar ayları akımlarını gözlem akımları ile uyumlu şekilde simüle ettiği belirlenmiştir. Şekil 4.3'teki Yağbasan model ön sonuçlarında ise genel anlamda model akım değerlerinin gözlem verisine nazaran düşük kaldığı ancak baz akımları uyumlu şekilde yansıttığı görülmüştür. Kalibrasyon işlemi ile model akım değerleri gözlem verilerine yaklaşılarak uyumlu bir temsiliyet sağlamıştır.

Kalibrasyonu ve validasyonu yapılmış model akım verileri ile gözlem verilerinin uyumluluğunu ölçen istatistiksel performans ölçütleri ve model değerlendirme dereceleri her bir AGİ için Tablo 4.5 ve 4.6’da gösterilmiştir.

Tablo 4.5. Model kalibrasyon performans sonuçları ve değerlendirme dereceleri.

AGİ	R ²	NSE	PBIAS	RSR	p-faktörü	r-faktörü
Dokurcun	0.87 (Çİ)	0.87 (Çİ)	3.7 (Çİ)	0.37 (Çİ)	0,80	0,77
Gebeş	0.91 (Çİ)	0.91 (Çİ)	-4.0 (Çİ)	0.30 (Çİ)	0,69	0,61
Yağbasan	0.80 (İ)	0.80 (İ)	-2.5 (Çİ)	0.45 (Çİ)	0,55	0,67

Çİ: Çok iyi, İ: İyi, TE: Tatmin edici

Tablo 4.6. Model validasyon performans sonuçları ve değerlendirme dereceleri.

AGİ	R ²	NSE	PBIAS	RSR	p-faktörü	r-faktörü
Dokurcun	0.80 (İ)	0.78 (İ)	-7.8 (İ)	0.47 (Çİ)	0,63	0,63
Gebeş	0.87 (Çİ)	0.87 (Çİ)	-3.6 (Çİ)	0.36 (Çİ)	0,67	0,60
Yağbasan	0.72 (TE)	0.71 (İ)	-11.8 (TE)	0.54 (İ)	0,60	0,73

Çİ: Çok iyi, İ: İyi, TE: Tatmin edici

1981-1990 yılları zaman aralığında Mudurnu Çayı üzerindeki ilk akım ölçüm istasyonu olan Dokurcun AGİ model ön sonuçları performans değerleri $R^2=0.16$, $NSE=-0.49$, $PBIAS=-20.4$, $RSR=1.18$ ’den kalibrasyon sonucunda $R^2=0.87$, $NSE=0.87$, $PBIAS=3.7$, $RSR=0.37$ değerlerine iyileştirilmiş olup tüm amaç fonksiyonlarına göre performans derecelendirmesinde “çok iyi” sınıfta yer almaktadır. Bu istasyonun mansabında yine Mudurnu Çayı üzerinde bulunan ve havza çıkış noktasına yakın bir konumda bulunan Gebeş AGİ model ön sonuçları performans değerleri $R^2=0.35$, $NSE=0.10$, $PBIAS=-31.6$, $RSR=0.95$ ’den kalibrasyon sonucunda $R^2=0.91$, $NSE=0.91$, $PBIAS=-4.0$, $RSR=0.30$ değerlerine iyileştirilmiş olup tüm amaç fonksiyonlarına göre performans derecelendirmesinde “çok iyi” sınıfta yer almaktadır. Mudurnu Çayı’nın bir kolu olan Dinsiz Çayı üzerinde bulunan Yağbasan AGİ model ön sonuçları performans değerleri ise $R^2=0.61$, $NSE=0.38$, $PBIAS=-37.9$, $RSR=0.79$ ’dan kalibrasyon sonucunda $R^2=0.80$, $NSE=0.80$, $PBIAS=-2.5$, $RSR=0.45$ değerlerine iyileştirilmiş olup performans derecelendirmesinde “çok iyi” ve “iyi” sınıfta yer almaktadır. Bu üç kalibrasyon işlemi içerisinde en yüksek başarı Gebeş AGİ’de elde edilmiş olup bunu Dokurcun AGİ ve Yağbasan AGİ takip etmektedir. 1991-1995 yılları zaman aralığında yapılan validasyon sonucunda ise Dokurcun AGİ performans değerleri olarak $R^2=0.80$, $NSE=0.78$, $PBIAS=-7.8$, $RSR=0.47$ elde edilmiş

olup performans derecelendirmesinde “çok iyi” ve “iyi” sınıfta yer almaktadır. Gebeş AGİ validasyon performans değerleri olarak $R^2=0.87$, $NSE=0.87$, $PBIAS=-3.6$, $RSR=0.36$ elde edilmiş olup tüm amaç fonksiyonlarına göre performans derecelendirmesinde “çok iyi” sınıfta yer almaktadır. Yağbasan AGİ performans değerleri olarak ise $R^2=0.72$, $NSE=0.71$, $PBIAS=-11.8$, $RSR=0.54$ değerleri elde edilmiş olup performans derecelendirmesinde “iyi” ve “tatmin edici” sınıfta yer almaktadır.

Elde edilen bu performans değerlerine göre; oluşturulan modelin havzanın hidrolojik süreçlerini yansıtmada ve reel durumda gözlemlenen akarsu akımlarının simüle edilmesinde oldukça başarılı olduğu belirlenmiştir. Bu sayede model, havzanın mevcut durumdaki yönetim stratejileri kapsamındaki kararlara yardımcı olabilecektir. Aynı zamanda oluşturulan bu model ile iklim modelleri ve senaryoları havzanın üzerine gelecek projeksiyonunda yansıtılarak iklim değişikliğinin havzadaki süreçlere olan etkilerinin görülmesi, bu etkilerin değerlendirilerek havzanın gelecek yönetim stratejisinin belirlenmesinde iklim değişikliğinin etkilerini azaltmaya yönelik kararlar alınabilecektir.

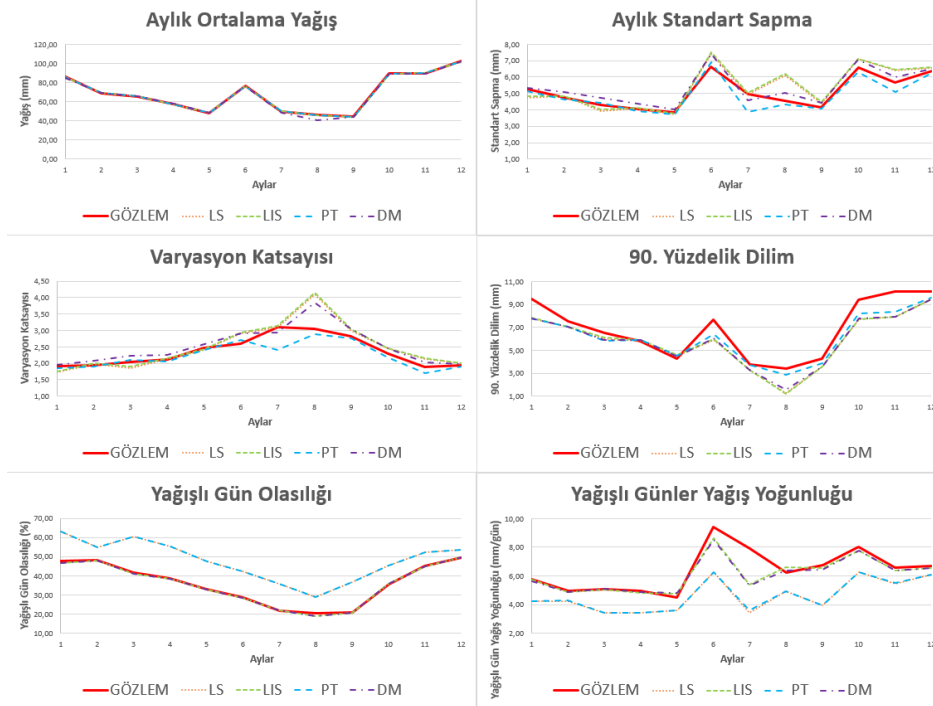
4.2. EC-Earth2 İklim Modeli Verileri ve Yanlılık (Bias) Düzeltme Sonuçları

EC-Earth2 modelinin RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için model verileri Sakarya ve Mudurnu meteoroloji gözlem istasyonlarına göre ayrı ayrı yanlılık (bias) düzeltme işlemine tabi tutulmuştur. Yağış için; doğrusal ölçeklendirme (LS), yerel yoğunluk ölçeklendirmesi (LOCI), güç dönüşümü (PT) ve dağılım haritalaması (DM) olmak üzere dört yöntem kullanılmıştır. Sıcaklık için ise; doğrusal ölçeklendirme (LS), varyans ölçeklendirmesi (VS) ve dağılım haritalaması olmak üzere üç yöntem kullanılmıştır. Referans tarihsel gözlem verisi olarak Sakarya ve Mudurnu MGİ’ler için 1970-1995 yılları günlük yağış, minimum ve maksimum sıcaklık verileri kullanılmıştır. Bu yöntemlerden elde edilen sonuçlar literatürde sıklıkla kullanılan Tablo 4.7’deki iklim indisleri ile analiz edilerek en iyi sonucu veren yöntem belirlenmiştir (Priyanko ve ark., 2022; Deutschbein ve Seibert, 2012, 2013; Worku ve ark., 2020; Zhang ve ark., 2018).

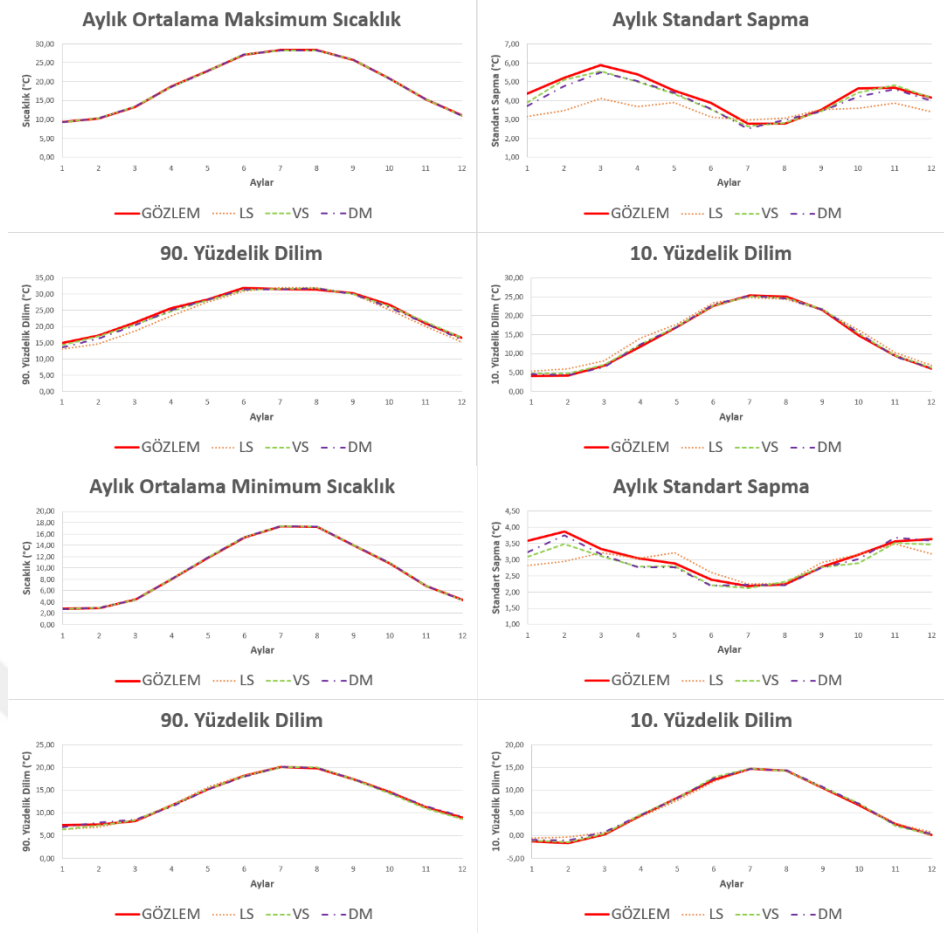
Tablo 4.7. Yanlılık (bias) düzeltme yöntemleri değerlendirme indisleri.

YAĞIŞ	SICAKLIK
Aylık Ortalama (μ)	Aylık Ortalama (μ)
90. Yüzdelik Dilim (X_{90})	10. ve 90. Yüzdelik Dilim (X_{10}, X_{90})
Standart Sapma (σ)	Standart Sapma (σ)
Varyasyon Katsayısı (CV)	
Yağışlı Gün Olasılığı (Pr_{wet})	
Yağışlı Günler Yağış Yoğunluğu (i_{wet})	

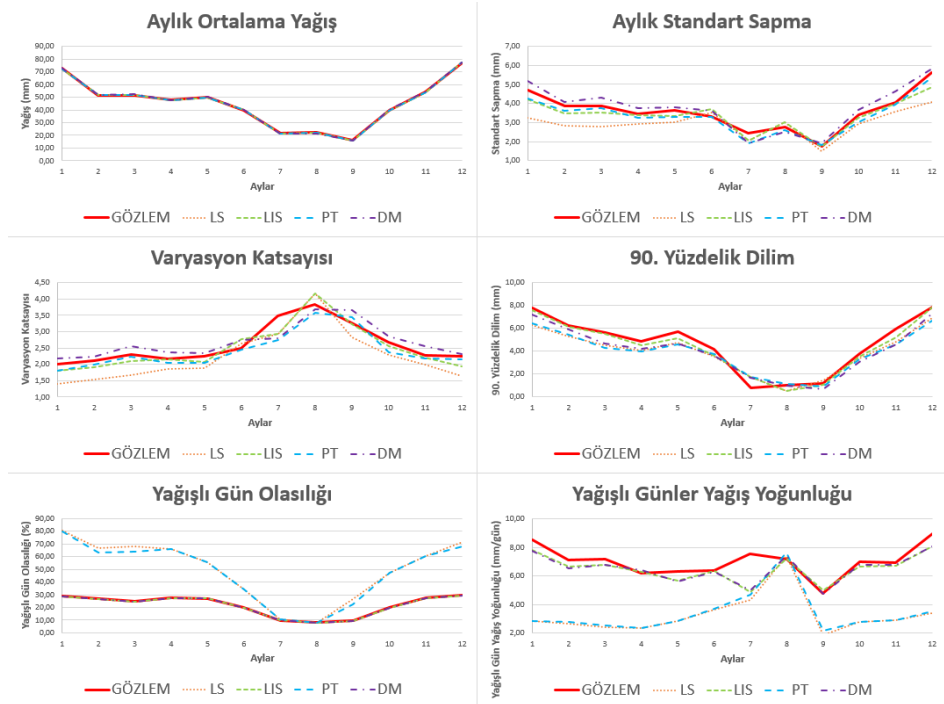
Yanlılık (bias) düzeltme ve değerlendirme işlemleri neticesinde yağış ve sıcaklık parametreleri için hesaplanan iklim indislerinin Sakarya MGİ için yağış grafikleri Şekil 4.4'te, sıcaklık grafikleri Şekil 4.5'te, Mudurnu MGİ için ise yağış grafikleri Şekil 4.6'da, sıcaklık grafikleri Şekil 4.7'de gösterilmektedir.



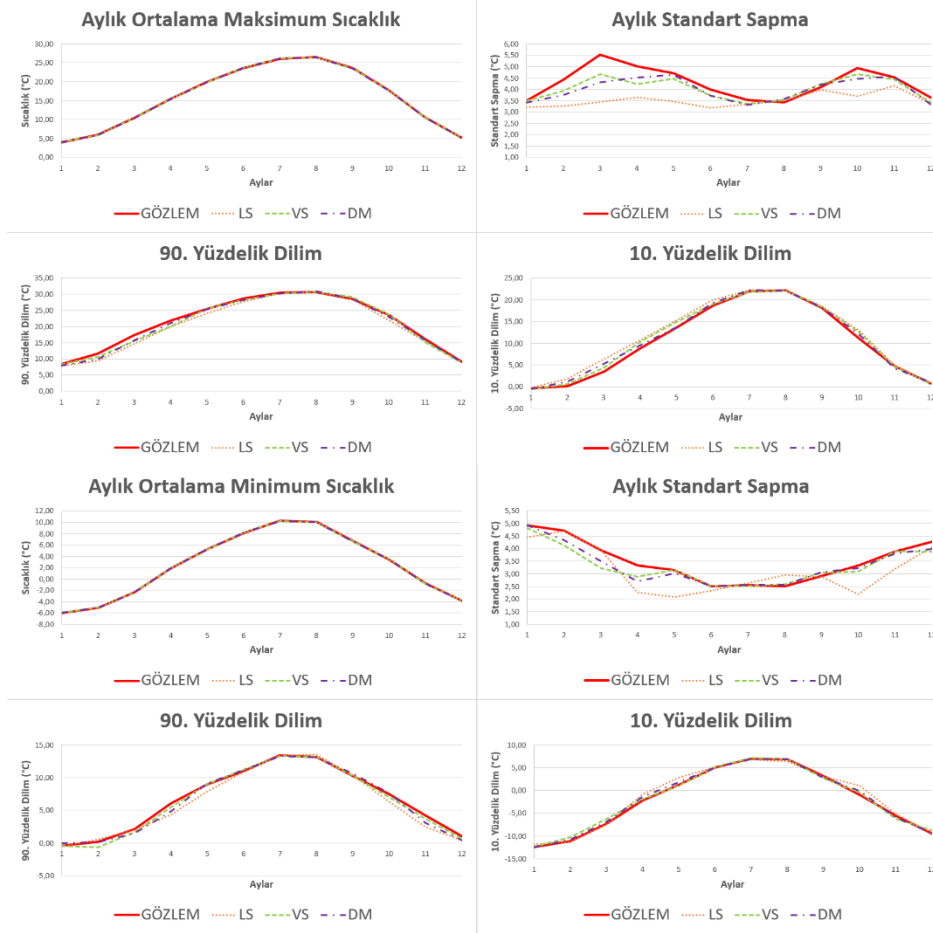
Şekil 4.4. Sakarya MGİ yağış verisi için yanlılık (bias) düzeltme yöntemlerine göre iklim indisleri grafikleri.



Şekil 4.5. Sakarya MGİ maksimum ve minimum sıcaklık verileri için yanlışlık (bias) düzeltme yöntemlerine göre iklim indisleri grafikleri.



Şekil 4.6. Mudurnu MGİ yağış verisi için yanlışlık (bias) düzeltme yöntemlerine göre iklim indisleri grafikleri.



Şekil 4.7. Mudurnu MGI maksimum ve minimum sıcaklık verileri için yanlışlık (bias) düzeltme yöntemlerine göre iklim indisleri grafikleri.

Yapılan bu analiz neticesinde her iki istasyona göre hem yağış hem de sıcaklık parametreleri için en iyi sonucu veren yanlışlık (bias) düzeltme yöntemi dağılım haritalaması (DM) olmuştur. Bunun sonucunda EC-Earth2 modeli tarihsel ve gelecek iklim verilerine dağılım haritalaması (DM) düzeltme yöntemi uygulanarak nihai iklim modeli verileri elde edilmiştir. Ham iklim modeli verileri ile yanlışlık (bias) düzeltme yapıldıktan sonraki iklim modeli verileri yıllık toplam yağış için Tablo 4.8’de, aylık ortalama maksimum ve minimum sıcaklık için Tablo 4.9’da gösterilmektedir.

Tablo 4.8. EC-Earth2 modeli iklim verileri ham ve yanlışlık (bias) düzeltmesi yapılmış yıllık toplam yağış sonuçları.

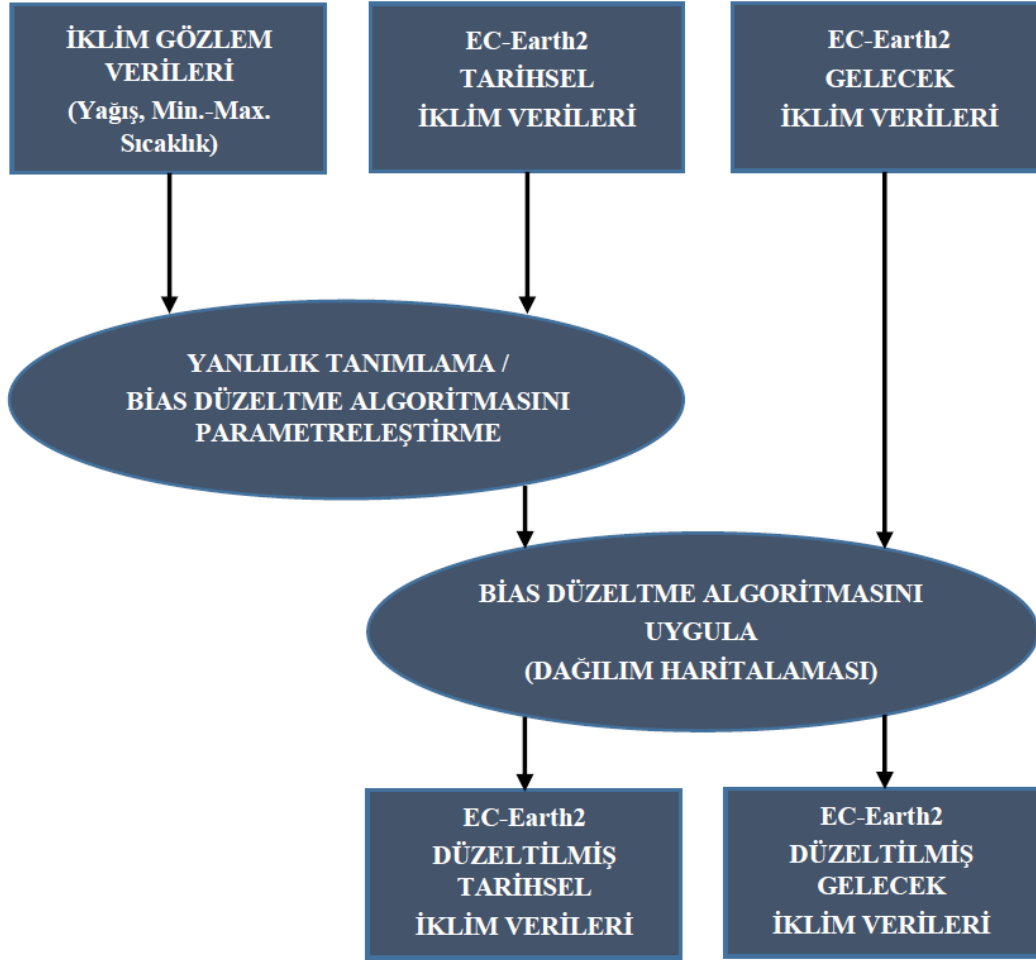
Meteoroloji İstasyonu	SAKARYA		MUDURNU	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Senaryolar				
Gözlem (1970-1995)		824,1		544,2
Tarihsel Ham (1970-1995)		424,7		523,4
Tarihsel Düzeltilmiş (1970-1995)	815,6	815,6	544,0	544,0
Gelecek Ham (2026-2100)	477,7	463,1	575,8	562,4
Gelecek Düzeltilmiş (2026-2100)	896,2	847,1	580,8	565,1

Tablo 4.9. EC-Earth2 modeli iklim verileri ham ve yanlışlık (bias) düzeltmesi yapılmış aylık ortalama maksimum ve minimum sıcaklık sonuçları.

Meteoroloji İstasyonu Senaryolar	SAKARYA				MUDURNU			
	RCP4.5		RCP8.5		RCP4.5		RCP8.5	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Gözlem (1970-1995)	19,31	9,70	19,31	9,70	15,78	2,34	15,78	2,34
Tarihsel Ham (1970-1995)	19,60	8,55	19,60	8,55	12,12	1,29	12,12	1,29
Tarihsel Düzeltilmiş (1970-1995)	19,31	9,70	19,31	9,70	15,78	2,34	15,78	2,34
Gelecek Ham (2026-2100)	21,22	10,21	22,16	11,04	14,38	3,57	15,69	4,76
Gelecek Düzeltilmiş (2026-2100)	21,18	11,36	22,22	12,17	18,38	4,79	19,86	6,07

Yağış için ham model verileri ve yanlışlık (bias) düzeltmesi yapılmış model verileri incelendiğinde EC-Earth2 modelinin havzanın Mudurnu bölgesini gözlem verileri ile uyumlu şekilde yansıttığı ancak iklim olarak farklı ve daha yağışlı olan havzanın mansap kısmında sapma gösterdiği görülmüştür. Sakarya bölgesinde yağışın bu derece düşük simüle edilmesi, modelin çözünürlüğünün etkisi olarak değerlendirilebilir. Daha yüksek çözünürlüklü bir modelleme ile farklı iklimlere sahip alanların modeller tarafından karakteristik özellikleri daha iyi yansıtılabilir. Yapılan yanlışlık (bias) düzeltmesi sonucunda Sakarya bölgesi için de yağış verileri uygun değerlere getirilmiştir.

Sıcaklık için ham model verileri ve yanlışlık (bias) düzeltmesi yapılmış model verileri incelendiğinde EC-Earth2 modelinin Sakarya bölgesinde maksimum ve minimum sıcaklıklar olarak gözlem verilerine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Mudurnu bölgesi için ise maksimum ve minimum sıcaklıkları olduğundan daha soğuk simüle ettiği gözlenmiştir. Yapılan yanlışlık (bias) düzeltmesi sonucunda Mudurnu bölgesi için de sıcaklık verileri uygun değerlere getirilmiştir. Modelin tarihsel verileri ile gözlem verileri arasındaki ilişkiden yararlanarak dağılım haritalaması (DM) yöntemi kullanılarak modelin gelecek 2021-2100 periyodunda RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre yanlışlık (bias) düzeltmesi yapılmış nihai iklim verileri elde edilmiştir. Uygulanan yanlışlık (bias) düzeltme çerçevesi Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



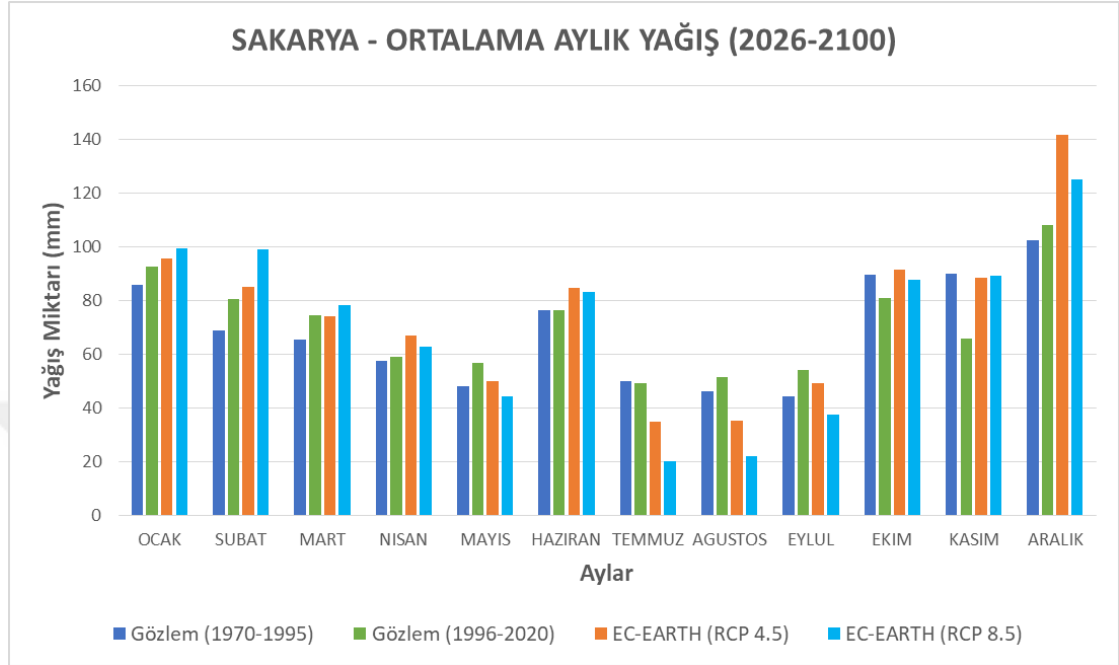
Şekil 4.8. EC-Earth2 İklim Modeli verilerine uygulanan yanlılık (bias) düzeltme çerçevesi.

4.3. EC-Earth2 İklim Modeli Meteorolojik Sonuçları

EC-Earth2 modelinin dağılım haritalaması (DM) kullanılarak yanlılık (bias) düzeltilmesi yapılmış RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre yağış ve sıcaklık verileri 2026-2100 gelecek projeksiyonu için analiz edilmiştir. Aylık veriler 2026-2100 periyodunda, mevsimsel ve yıllık veriler ise 2026-2060 ve 2061-2100 periyotlarına göre analiz edilmiştir. Kıyaslama yapılması amacıyla Sakarya ve Mudurnu MGİ'lerin 1970-1995 periyodu gözlem verileri de grafiklere eklenmiştir. Ayrıca ölçüm değerleri devam eden Sakarya MGİ istasyonu için 1996-2020 periyodu gözlem verileri de ayrı bir sütun olarak grafiklere eklenmiştir.

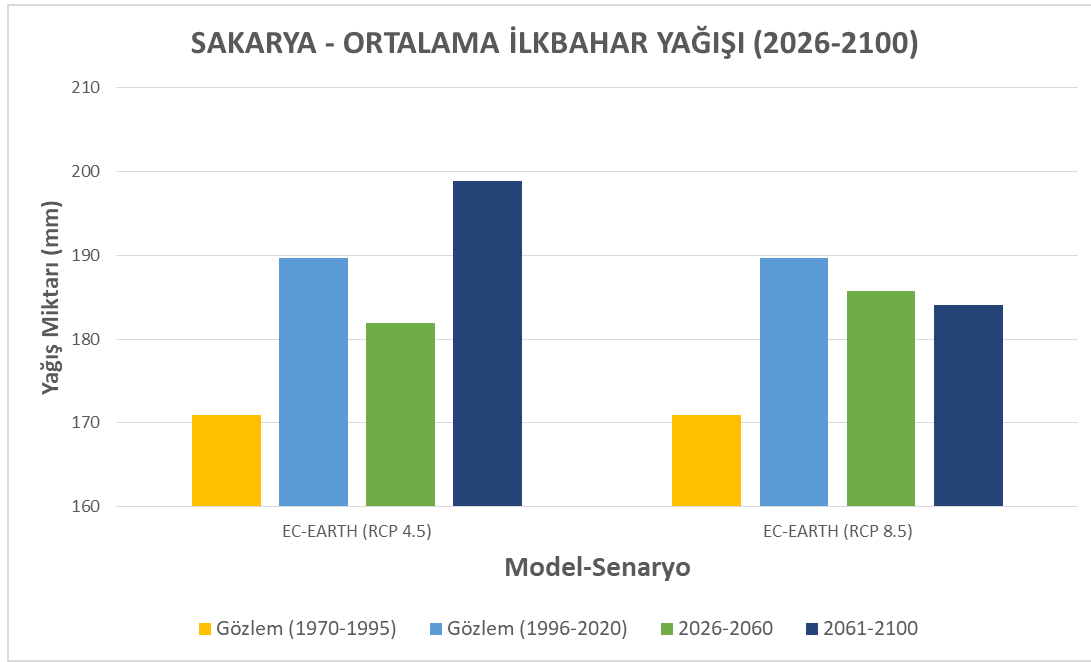
4.3.1. Sakarya bölgesi meteorolojik sonuçları

Sakarya bölgesi için; ortalama aylık yağışlar Şekil 4.9’da, mevsimsel ortalama yağışlar Şekil 4.10-4.13’te, yıllık toplam yağışlar Şekil 4.14’da gösterilmektedir.

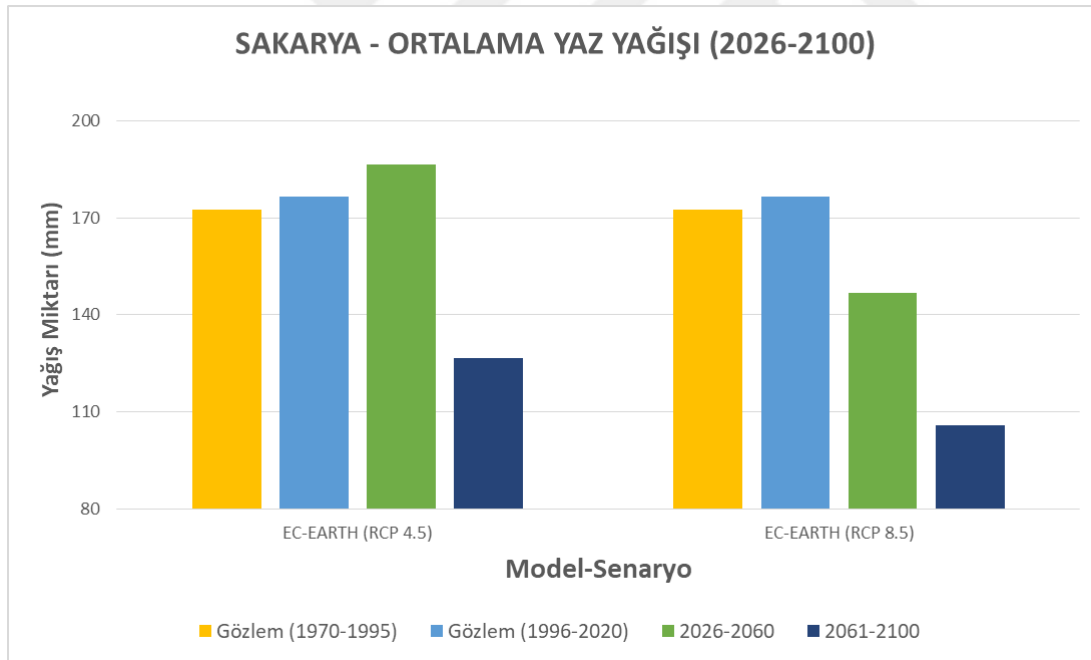


Şekil 4.9. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama aylık yağış grafiği.

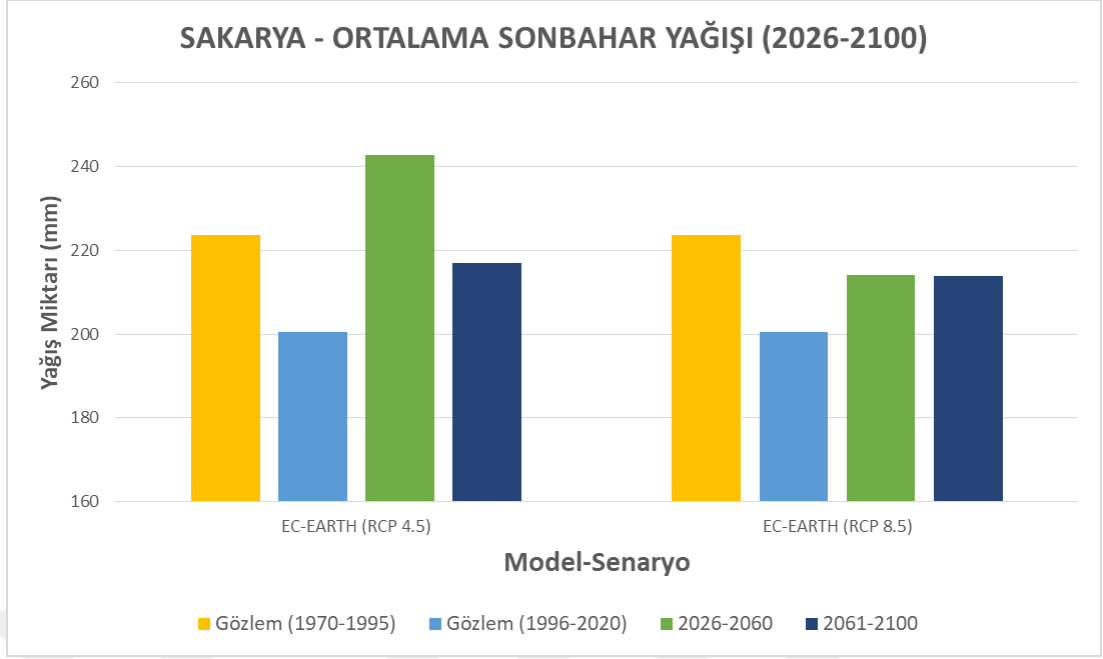
Ortalama aylık yağışlar incelendiğinde gözlem verilerinde 1970-1995 periyoduna göre 1996-2020 periyodunda yağış miktarlarının genel olarak az da olsa arttığı görülmüştür. Gelecek simülasyonunda ise RCP4.5 senaryosunda Aralık-Nisan arası sulak dönemde gözlem periyotlarına göre yağış miktarın ortalama 13 mm arttığı, Temmuz-Eylül arası kurak dönemde ise ortalama 9 mm azaldığı görülmüştür. RCP8.5 senaryosunda Aralık-Nisan arası sulak dönemde yağışta ortalama 13 mm artış olduğu, Temmuz-Eylül kurak dönemde ise yağış miktarının 23 mm düştüğü gözlenmiştir.



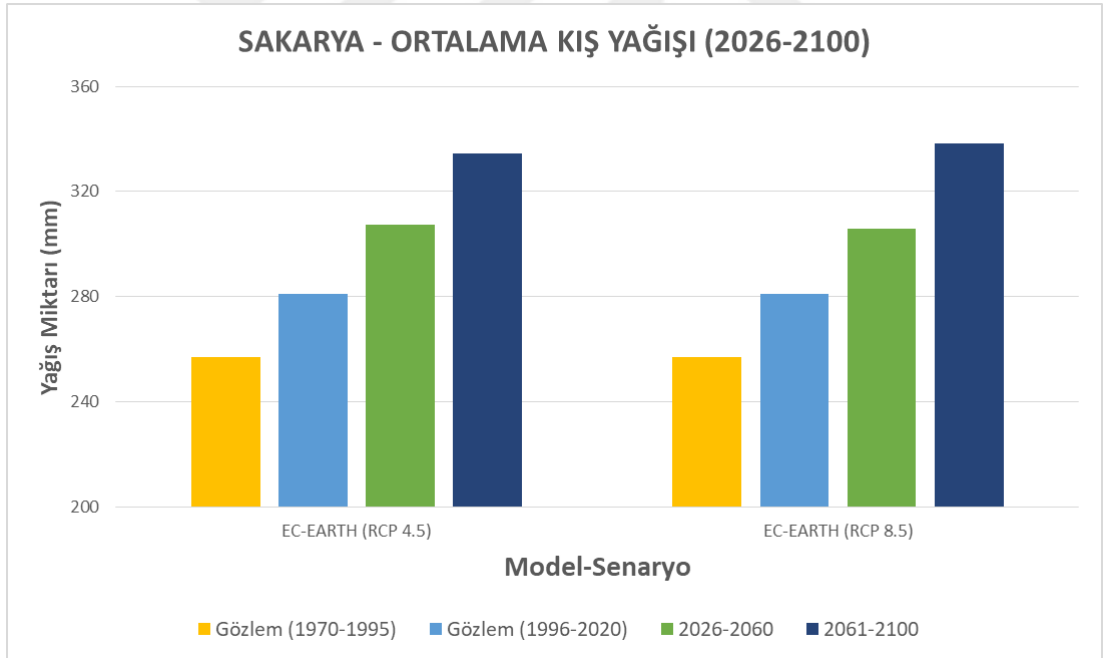
Şekil 4.10. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama ilkbahar yağış grafiği.



Şekil 4.11. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama yaz yağış grafiği.



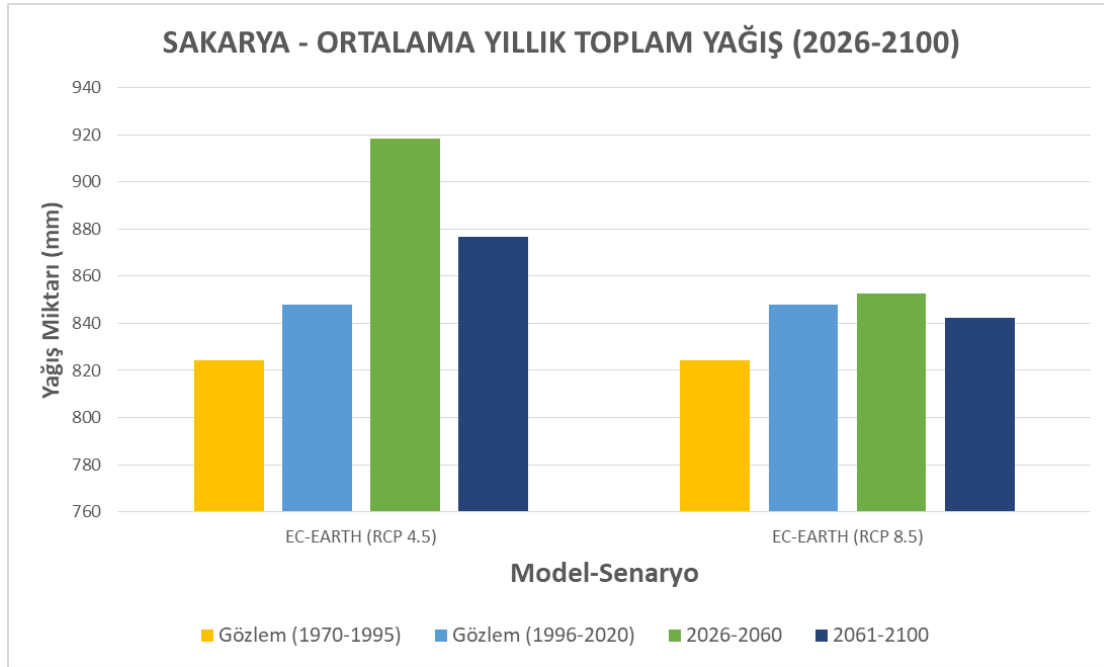
Şekil 4.12. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama sonbahar yağış grafiği.



Şekil 4.13. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama kış yağış grafiği.

Mevsimsel yağışlar incelendiğinde gözlem verilerinde 1970-1995 periyoduna göre 1996-2020 periyodunda yağış miktarlarının genel olarak artış görülmele birlikte sonbahar yağışında azalma gerçekleşmiştir. Gelecek simülasyonunda ilkbahar yağışlarında RCP4.5 senaryosunda 2026-2060 periyodunda kısmi düşüş olmakla

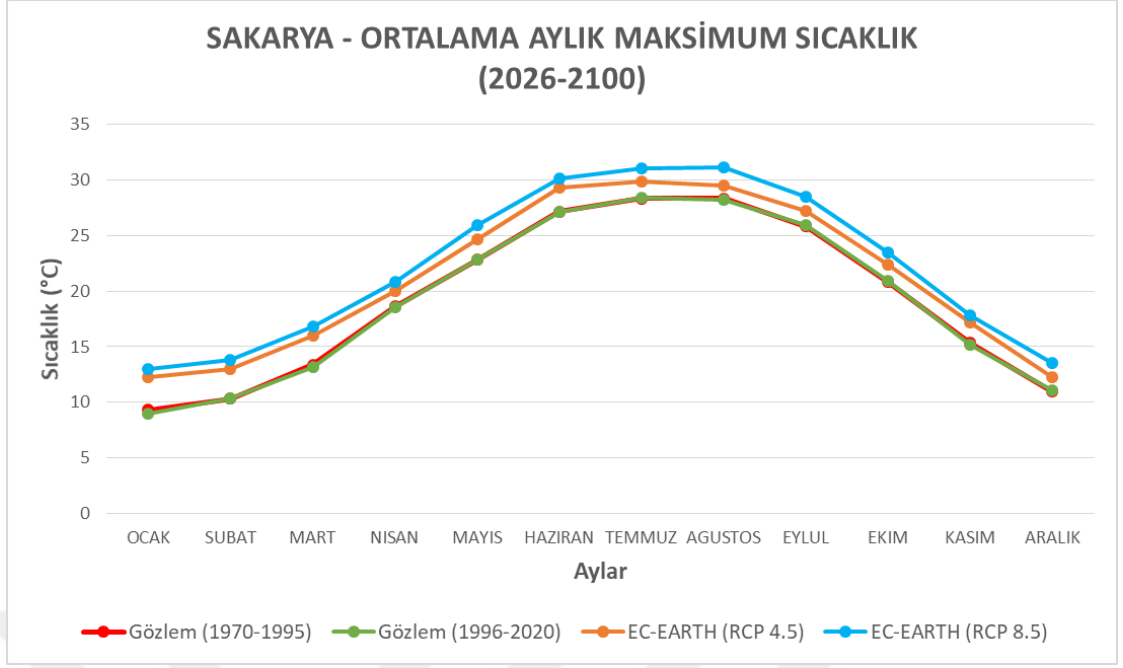
birlikte 2061-2100 periyodunda artış devam etmiştir. RCP8.5 senaryosunda 2026-2061 ve 2061-2100 periyotlarında yağışta düşüş görülmektedir. Yaz yağışı gelecek simülasyonunda RCP4.5 senaryosu için 2026-2060 periyodunda kısmi artış olmakla birlikte 2061-2100 periyodunda yağış düşmektedir. RCP8.5 senaryosunda her iki gelecek dönemde de yaz yağışları düşme eğilimindedir. Sonbahar yağışı gelecek simülasyonunda RCP4.5 senaryosu için 2026-2060 periyodunda artış olmakla birlikte 2061-2100 periyodunda kısmi düşüş olmaktadır. RCP8.5 senaryosunda genel olarak yağışın gözlem ortalamasında kaldığı görülmüştür. Kış yağışı gelecek simülasyonunda ise hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryoları için 2026-2060 ve 2061-2100 periyotlarında yağışlar artmaktadır.



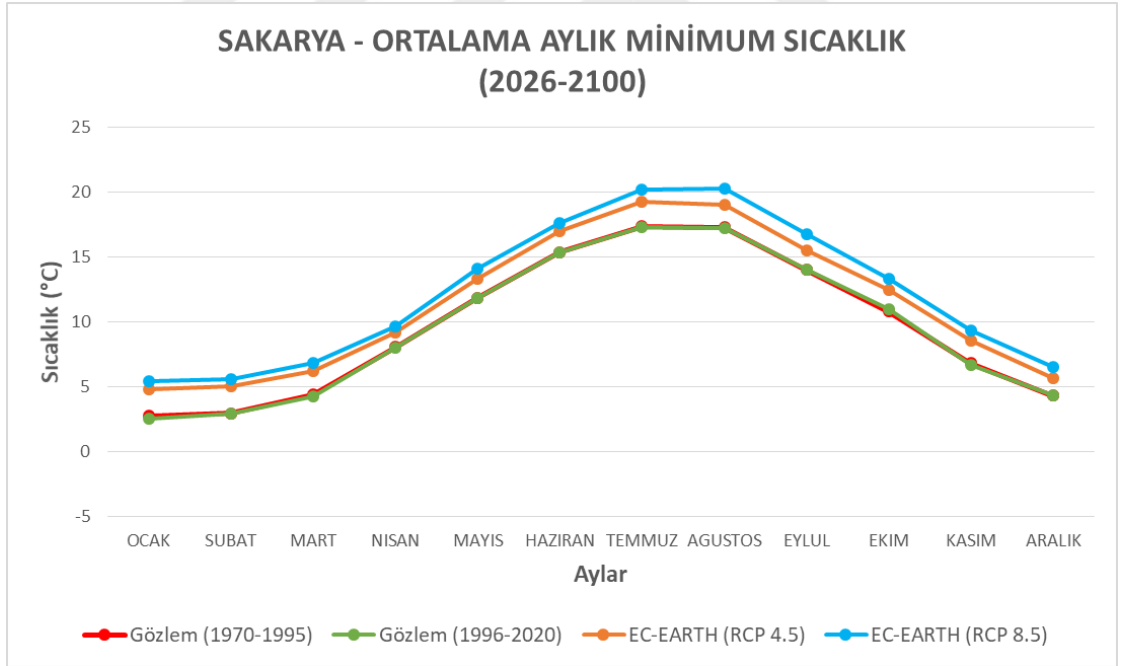
Şekil 4.14. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) yıllık toplam yağış grafiği.

1970-1995 ve 1996-2020 gözlem aralıklarında yıllık toplam yağışın 20 mm arttığı görülmektedir. Gelecek simülasyonunda RCP4.5 senaryosunda 2026-2060 ve 2061-2100 periyotları için genel olarak yağış miktarının yükseldiği ve ortalama 70 mm civarında artış olduğu görülmektedir. RCP8.5 senaryosunda ise 2026-2060 ve 2061-2100 periyotlarında yağış miktarında dikkate değer bir değişiklik olmamıştır.

Sakarya bölgesi için; ortalama aylık maksimum ve minimum sıcaklıklar Şekil 4.15-4.16'da, mevsimsel maksimum ve minimum sıcaklıklar Şekil 4.17-4.24'te, ortalama yıllık maksimum ve minimum sıcaklıklar ise Şekil 4.25-4.26'da gösterilmektedir.



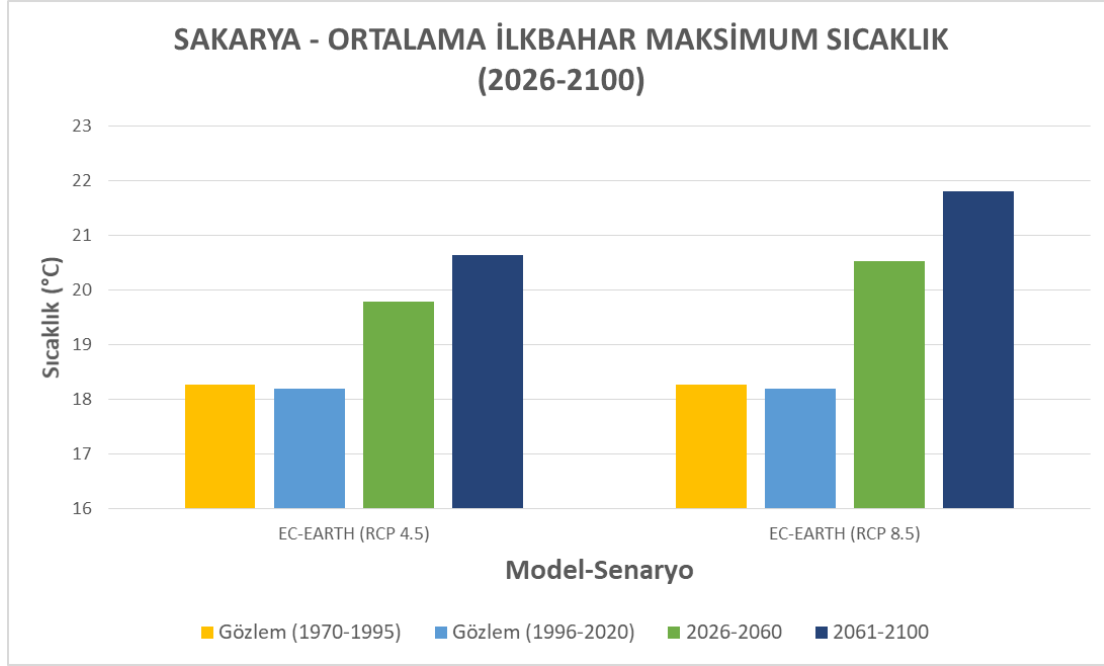
Şekil 4.15. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama aylık maksimum sıcaklık grafiği.



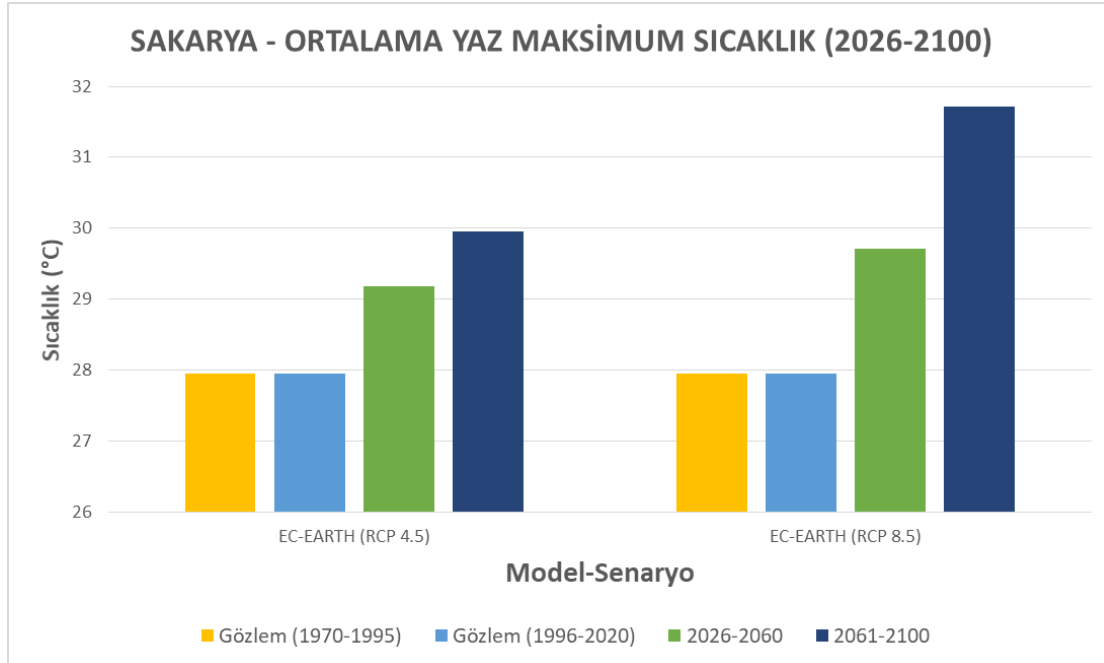
Şekil 4.16. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama aylık minimum sıcaklık grafiği.

Hem maksimum sıcaklık hem de minimum sıcaklık grafikleri incelendiğinde 1970-1995 ve 1996-2020 gözlem periyotlarında sıcaklıklarda değişiklik olmamıştır. Ancak gelecek simülasyonunda maksimum ve minimum sıcaklıklar için tüm aylar için

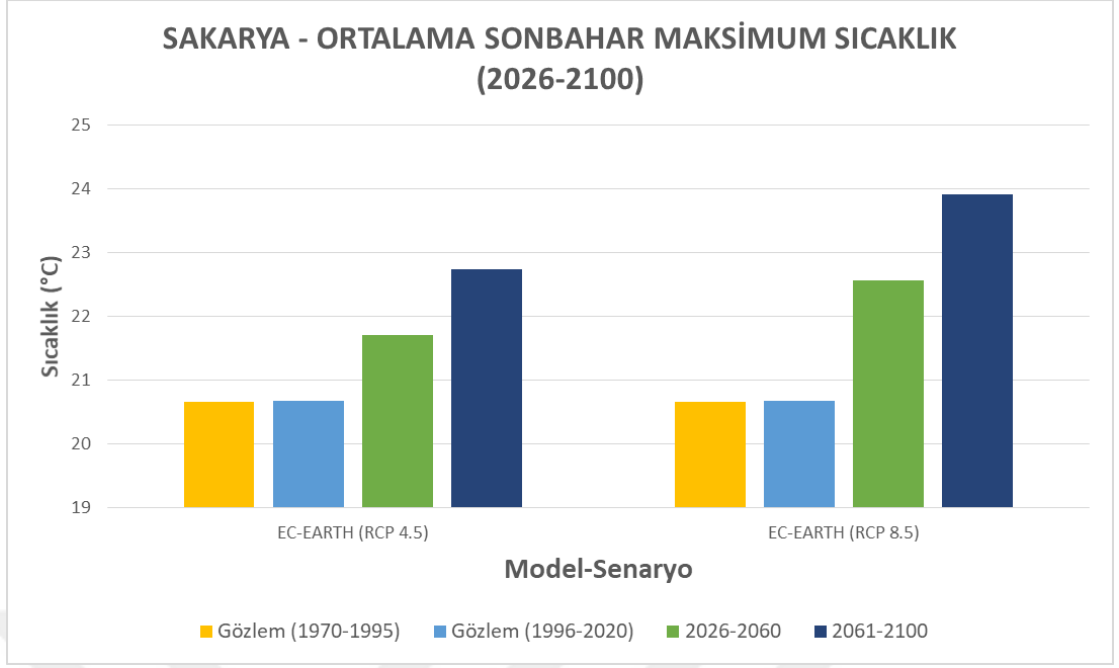
düzenli ve belirgin bir artış olmaktadır. RCP8.5 senaryosunda maksimum ve minimum sıcaklıklar RCP4.5 senaryosuna göre daha fazla artış göstermiştir.



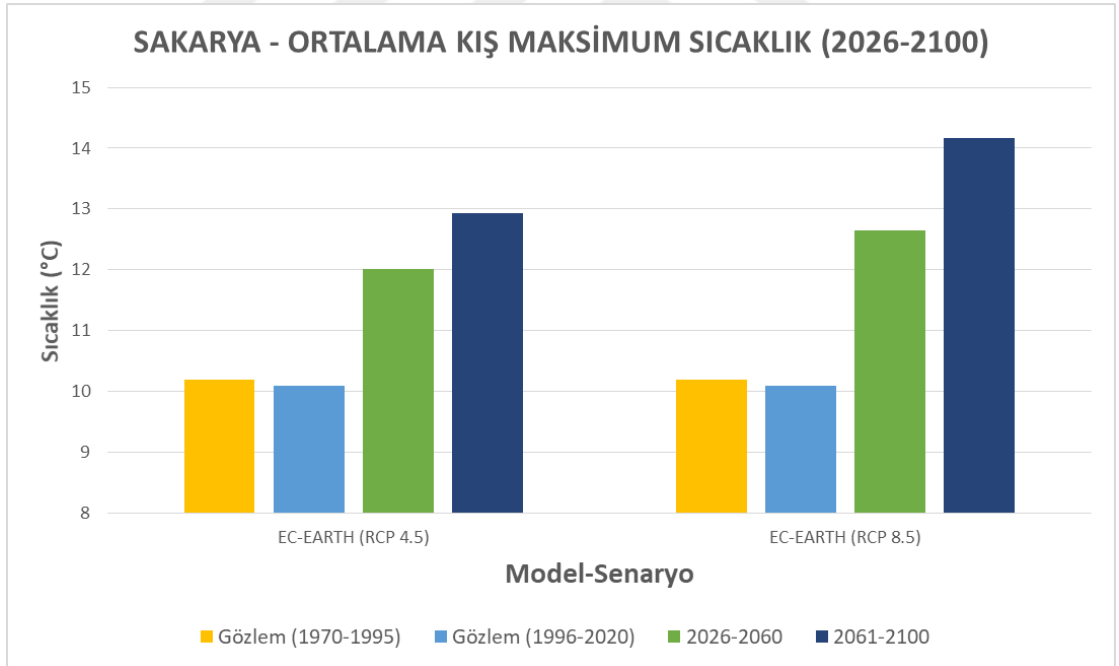
Şekil 4.17. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama ilkbahar maksimum sıcaklık grafiği.



Şekil 4.18. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama yaz maksimum sıcaklık grafiği.



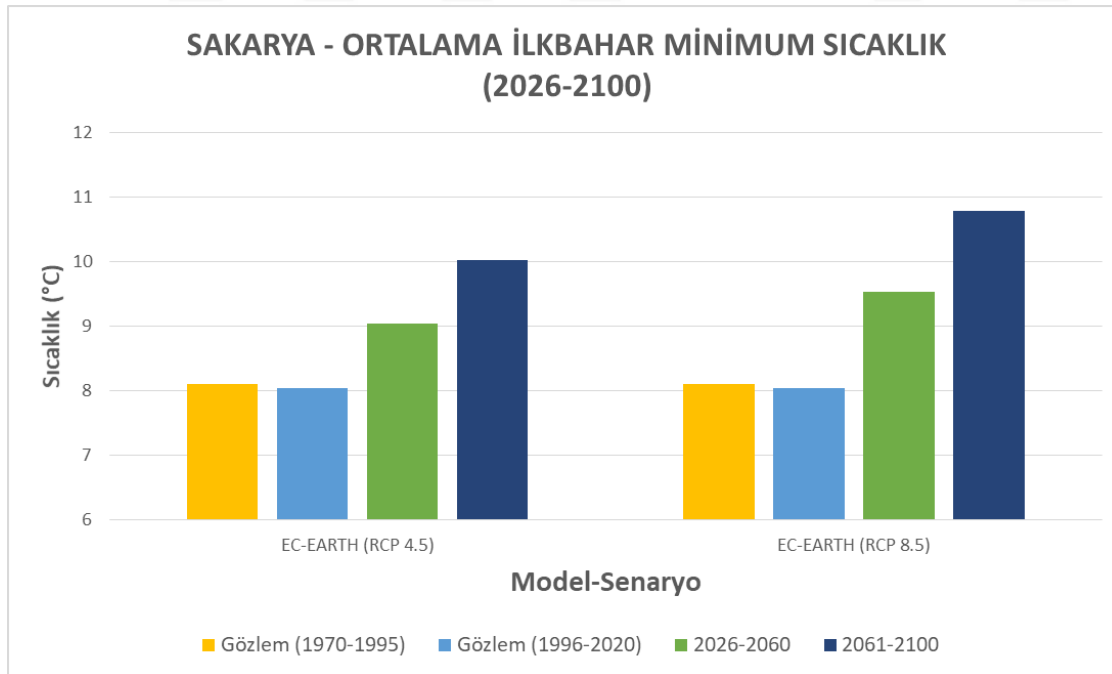
Şekil 4.19. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama sonbahar maksimum sıcaklık grafiği.



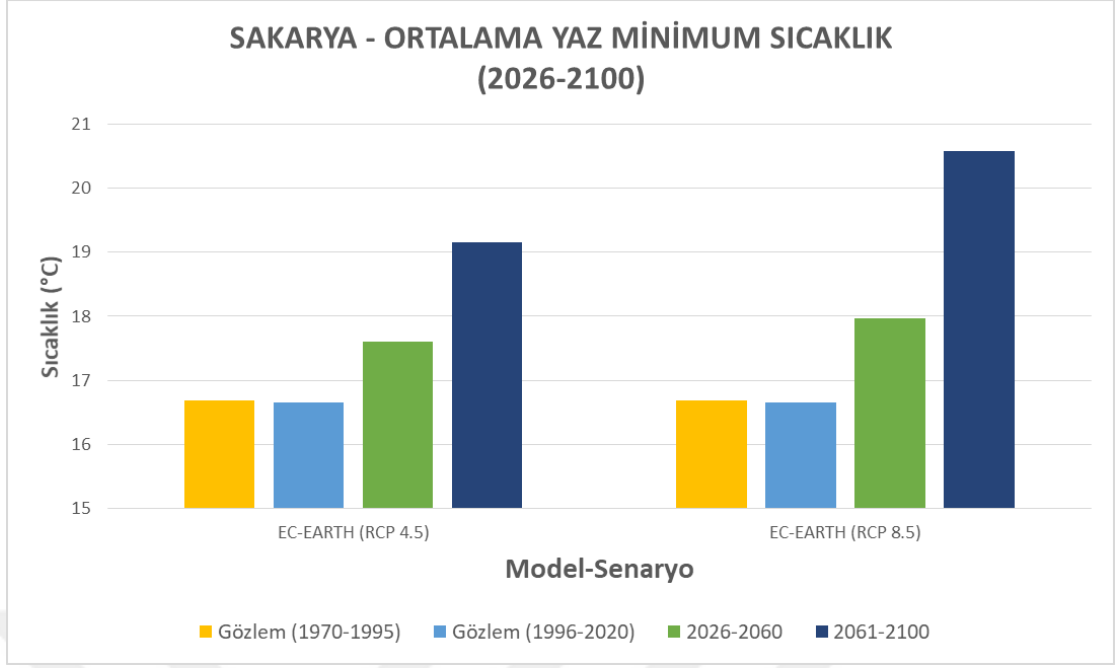
Şekil 4.20. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama kış maksimum sıcaklık grafiği.

Mevsimsel aylık ortalama maksimum sıcaklıklar incelendiğinde 1970-1995 ve 1996 2020 gözlem periyotlarında sıcaklıkların değişim göstermediği görülmüştür. Gelecek projeksiyonu ilkbahar maksimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine

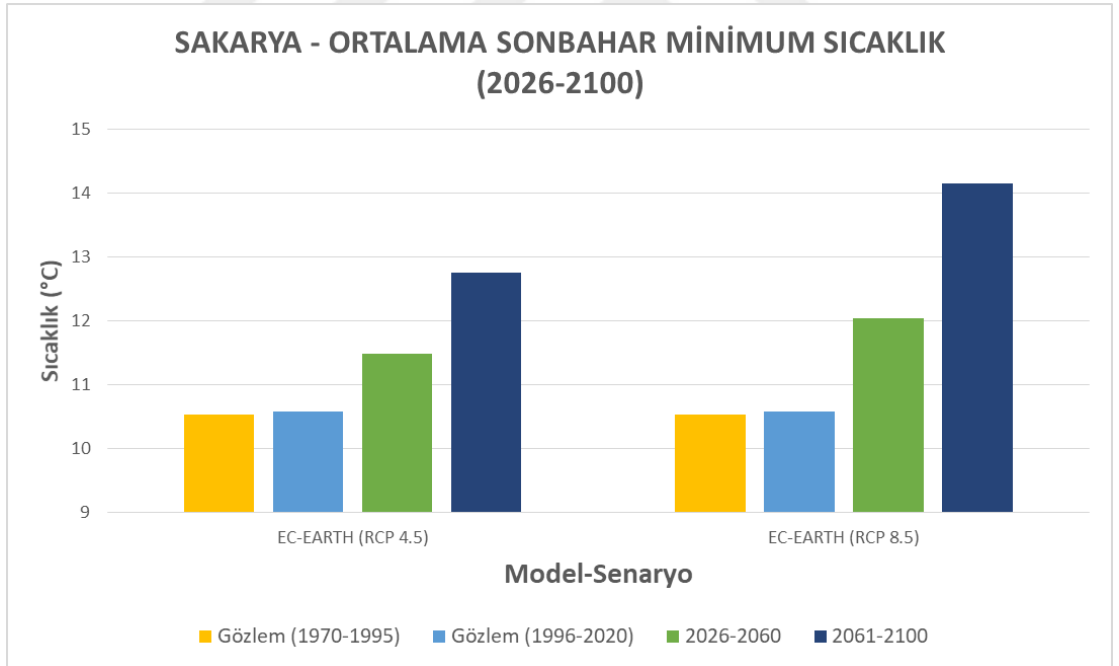
göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda ilkbahar maksimum sıcaklığında yaklaşık 2 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3 °C artış görülmektedir. Yaz maksimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda yaz maksimum sıcaklığında yaklaşık 1,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3 °C artış görülmektedir. Sonbahar maksimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda sonbahar maksimum sıcaklığında yaklaşık 1,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 2,5 °C artış görülmektedir. Kış maksimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda kış maksimum sıcaklığında yaklaşık 2,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3,5 °C artış görülmektedir.



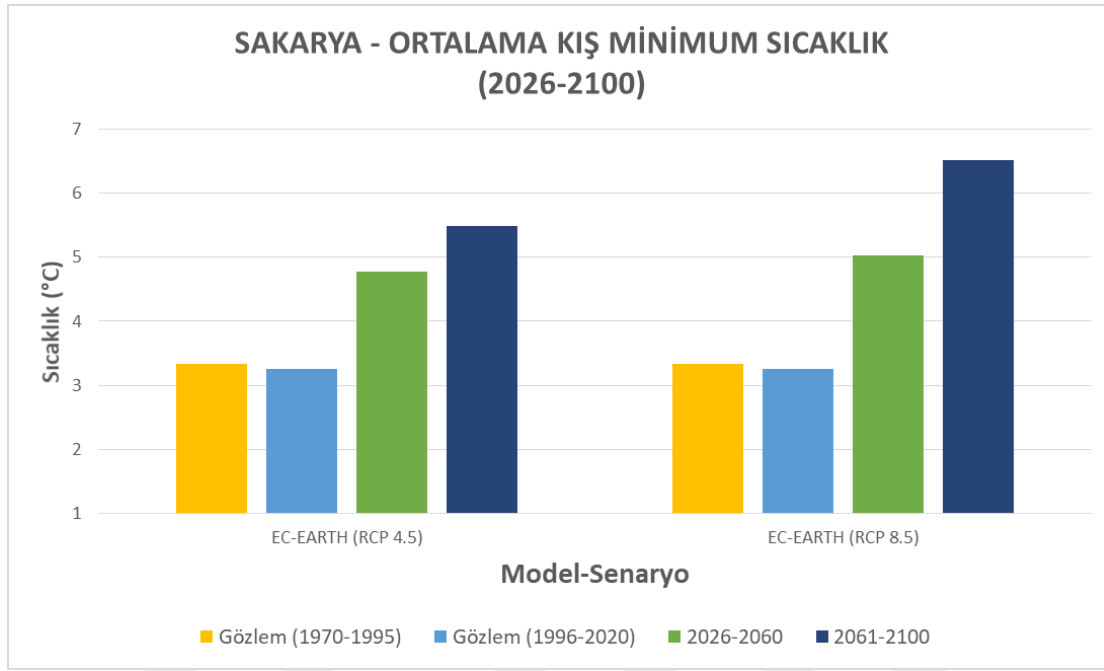
Şekil 4.21. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama ilkbahar minimum sıcaklık grafiği.



Şekil 4.22. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama yaz minimum sıcaklık grafiği.



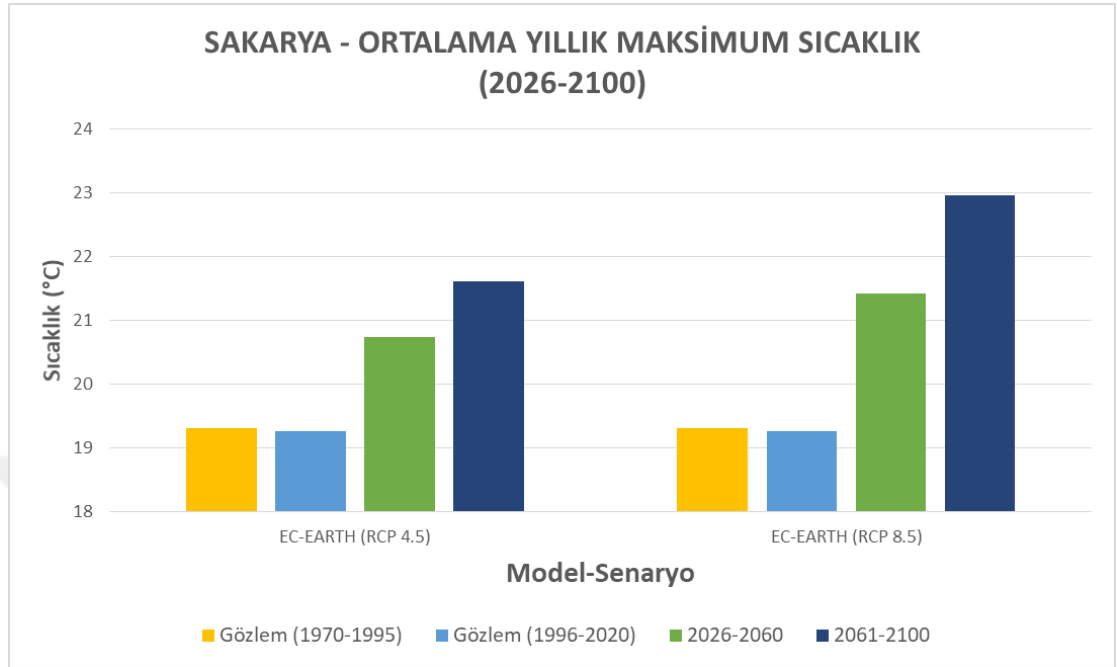
Şekil 4.23. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama sonbahar minimum sıcaklık grafiği.



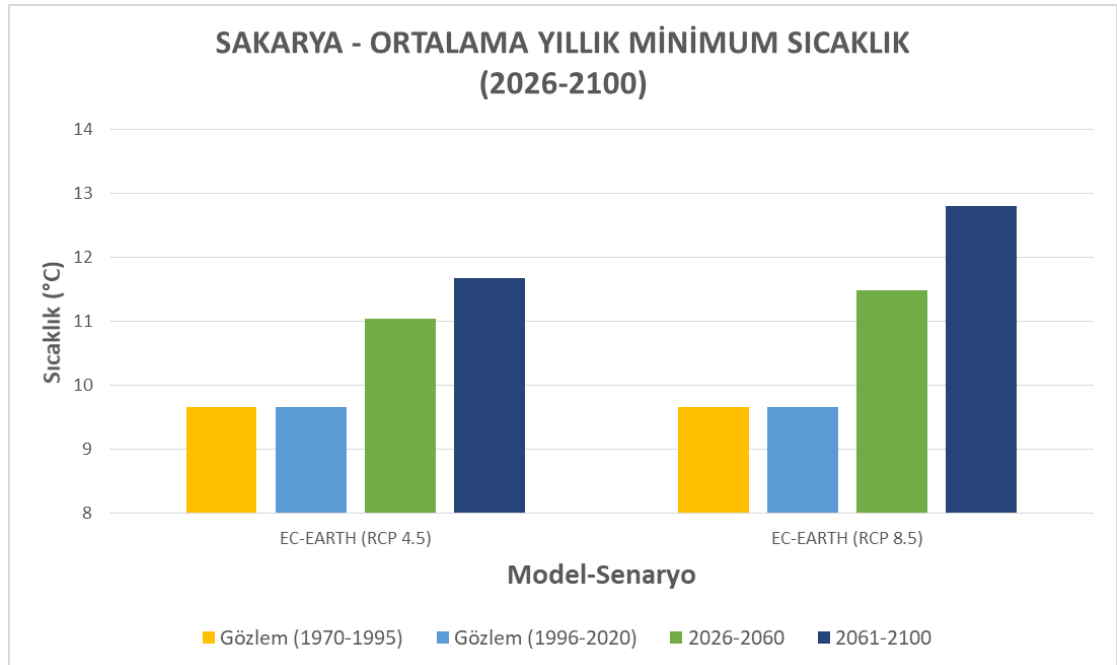
Şekil 4.24. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama kış minimum sıcaklık grafiği.

Mevsimsel aylık ortalama minimum sıcaklıklar incelendiğinde 1970-1995 ve 1996-2020 gözlem periyotlarında sıcaklıkların değişim göstermediği görülmüştür. Gelecek projeksiyonu ilkbahar minimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda ilkbahar minimum sıcaklığında yaklaşık 1,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 2 °C artış görülmektedir. Yaz minimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda yaz minimum sıcaklığında yaklaşık 1,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 2,5 °C artış görülmektedir. Sonbahar minimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda sonbahar minimum sıcaklığında yaklaşık 1,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 2,5 °C artış görülmektedir. Kış minimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5

senaryosunda kış minimum sıcaklığında yaklaşık 2 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 2,5 °C artış görülmektedir.



Şekil 4.25. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama yıllık maksimum sıcaklık grafiği.

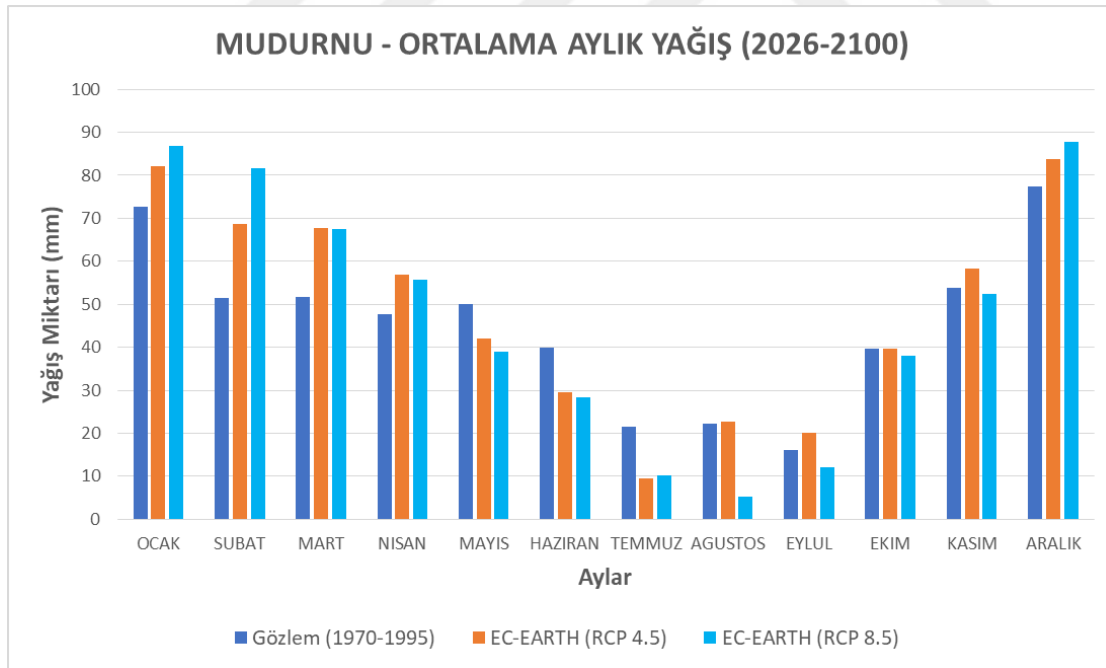


Şekil 4.26. EC-Earth2 modeli, Sakarya bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ve (1996-2020) ortalama yıllık minimum sıcaklık grafiği.

Ortalama yıllık maksimum ve minimum sıcaklıklar incelendiğinde 1970-1995 ve 1996-2020 gözlem periyotlarında sıcaklıkların değişim göstermediği görülmüştür. Gelecek projeksiyonu ortalama yıllık maksimum sıcaklık RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda ortalama yıllık maksimum sıcaklıkta yaklaşık 2 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3 °C artış görülmektedir. Ortalama yıllık minimum sıcaklık RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda ortalama yıllık minimum sıcaklıkta yaklaşık 1,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 2,5 °C artış görülmektedir.

4.3.2. Mudurnu bölgesi meteorolojik sonuçları

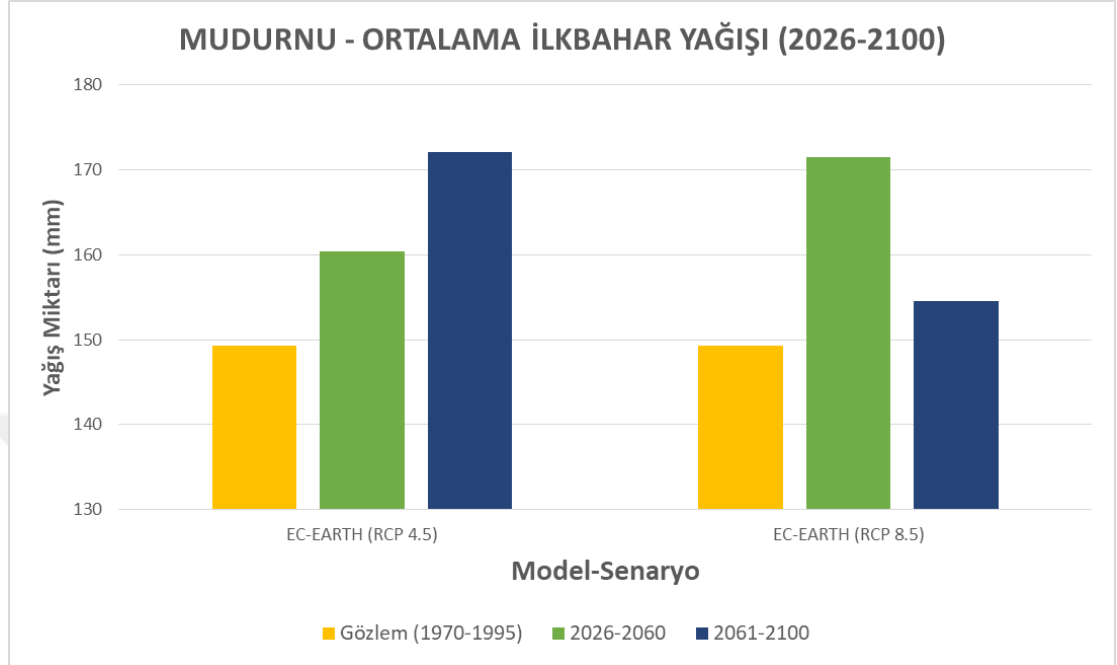
Mudurnu bölgesi için; ortalama aylık yağışlar Şekil 4.27’de, mevsimsel ortalama yağışlar Şekil 4.28-4.31’de, yıllık toplam yağışlar Şekil 4.32’de gösterilmektedir.



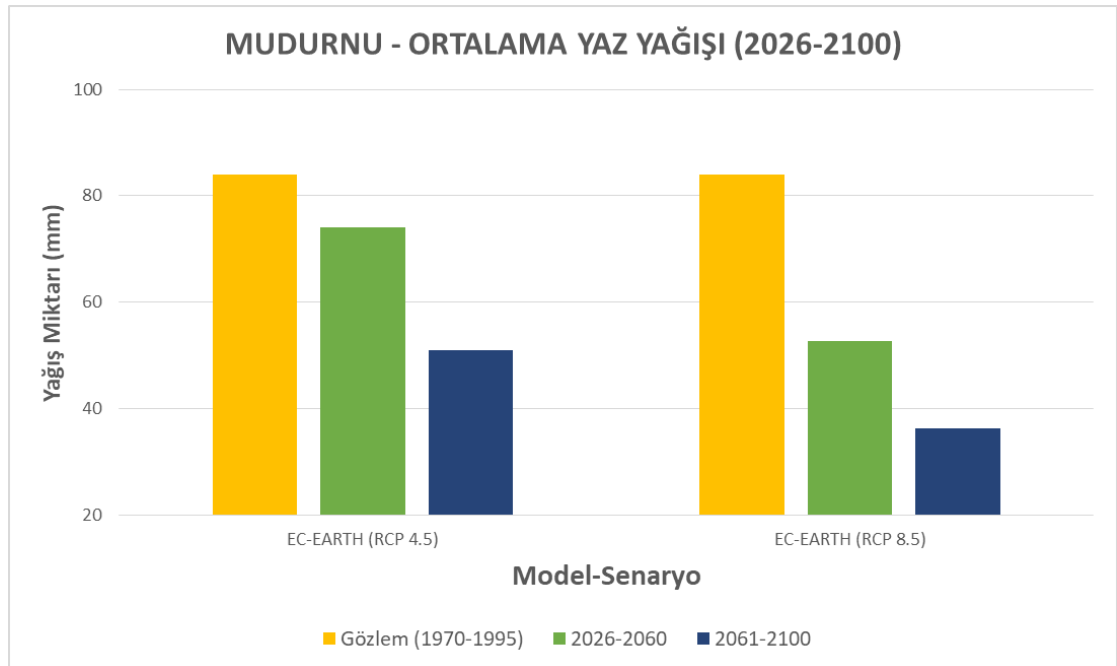
Şekil 4.27. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1970-1995) ortalama aylık yağış grafiği.

Ortalama aylık yağışlar incelendiğinde gelecek simülasyonunda RCP4.5 senaryosunda Aralık-Nisan arası sulak dönemde gözlem verilerine göre yağış miktarın ortalama 12

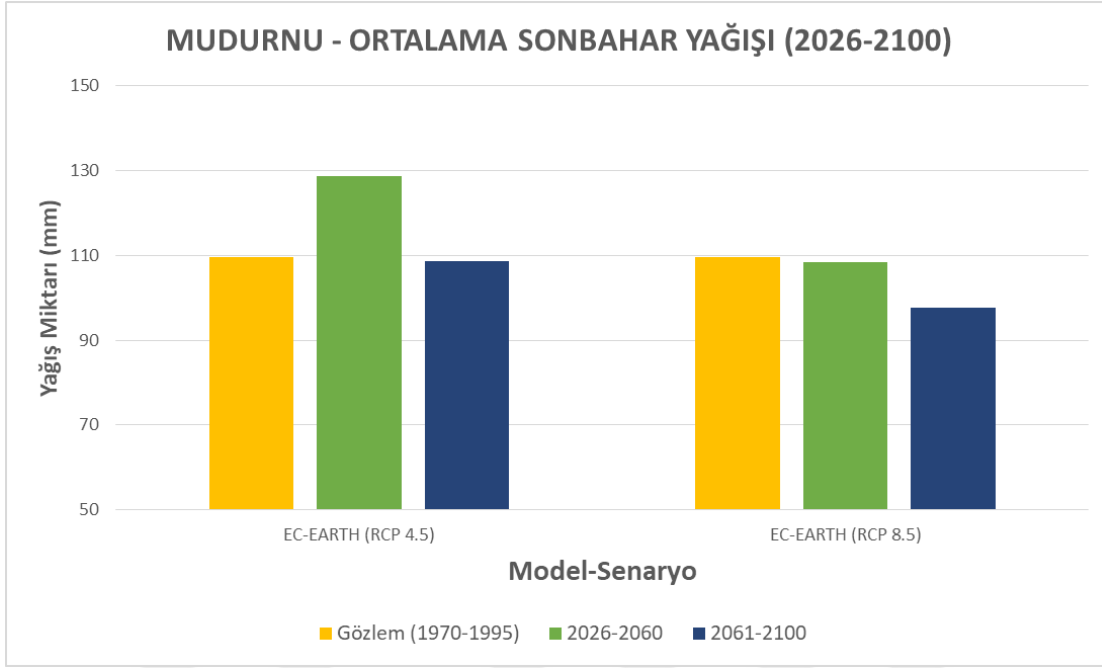
mm arttığı, Mayıs-Eylül arası kurak dönemde ise ortalama 5 mm azaldığı görülmüştür. RCP8.5 senaryosunda Aralık-Nisan arası sulak dönemde yağışta ortalama 16 mm artış olduğu, Mayıs-Eylül arası kurak dönemde ise ortalama 11 mm düştüğü gözlenmiştir.



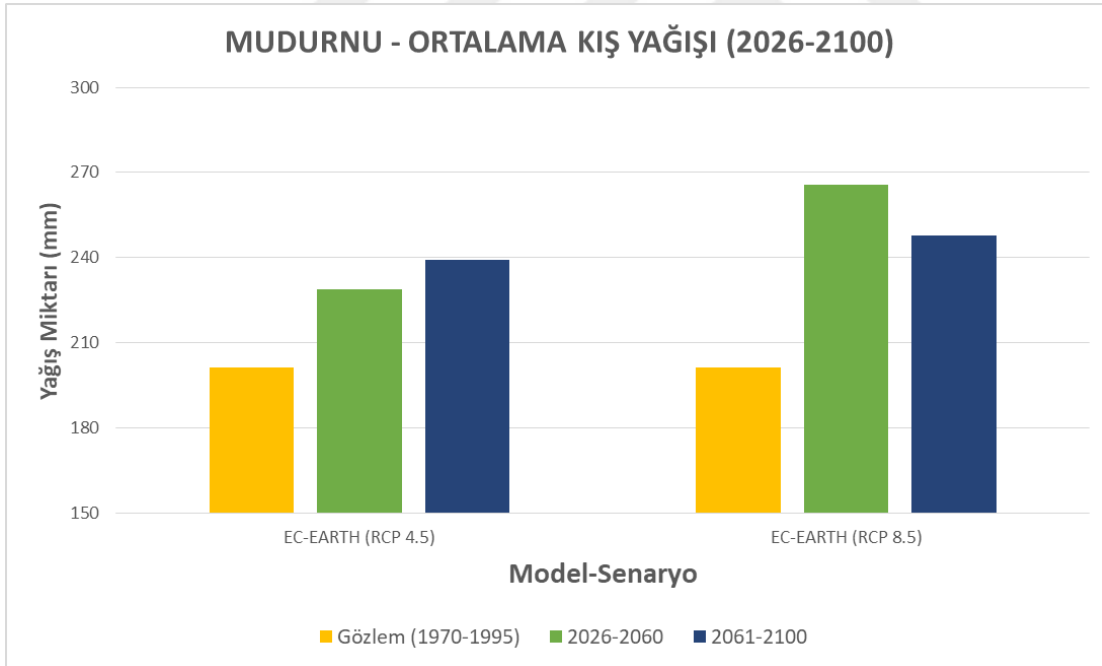
Şekil 4.28. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama ilkbahar yağış grafiği.



Şekil 4.29. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama yaz yağış grafiği.



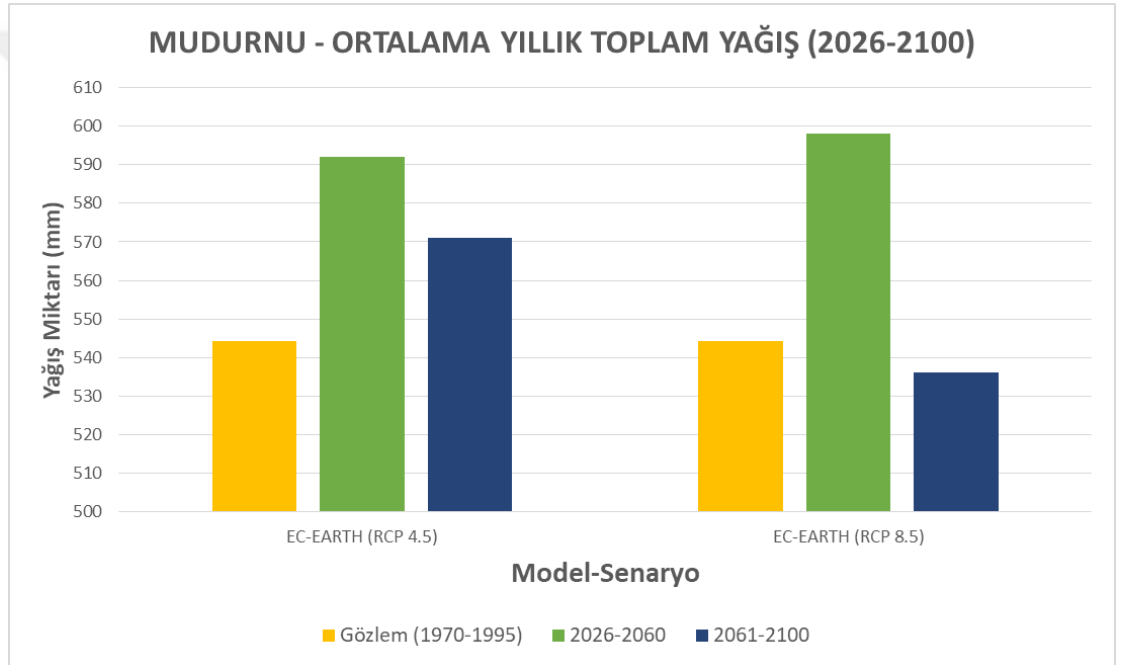
Şekil 4.30. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama sonbahar yağış grafiği.



Şekil 4.31. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama kış yağış grafiği.

Mevsimsel yağışlar incelendiğinde gözlem verilerine göre gelecek simülasyonunda ilkbahar yağışlarında RCP4.5 senaryosunda 2026-2060 periyodunda artış olmakla birlikte, 2061-2100 periyodunda artış daha fazla olmuştur. RCP8.5 senaryosunda 2026-2061 artış olmakla birlikte 2061-2100 periyodunda yağış artış miktarı daha azdır.

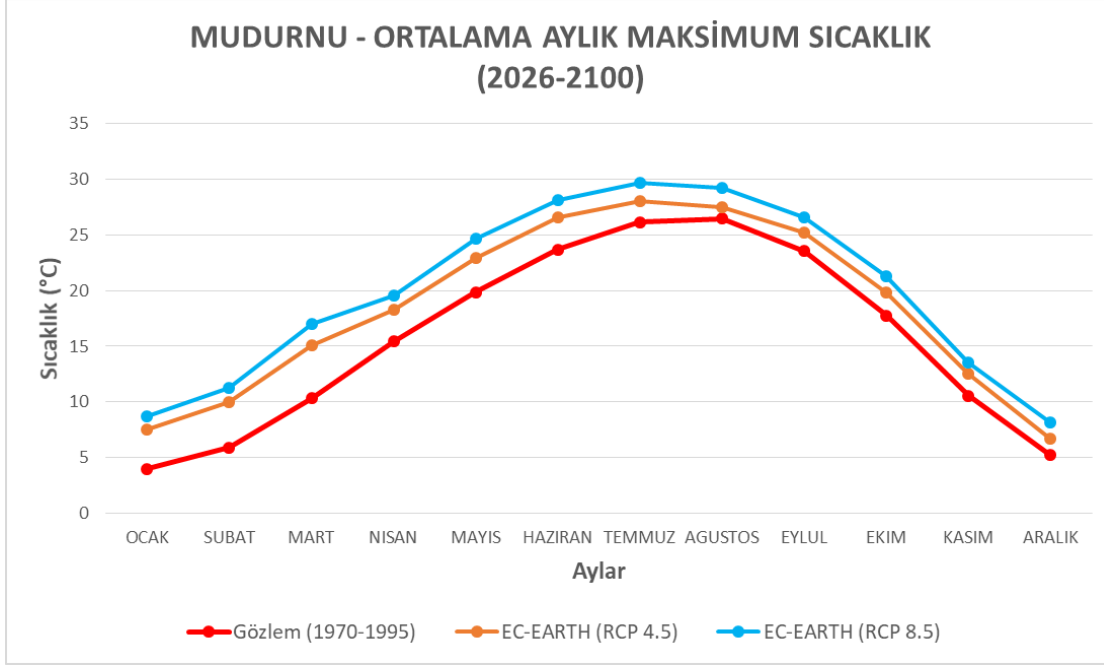
Yaz yağışı gelecek simülasyonunda RCP4.5 senaryosu için 2026-2060 ve 2061-2100 periyotlarında yağış artan şekilde düşmektedir. RCP8.5 senaryosunda her iki gelecek dönemde yaz yağışları daha fazla düşme eğilimindedir. Sonbahar yağışı gelecek simülasyonunda RCP4.5 senaryosu için 2026-2060 periyodunda artış olmakla birlikte 2061-2100 periyodunda kısmi düşüş olmaktadır. RCP8.5 senaryosunda 2026-2060 periyodunda genel olarak yağışın gözlem ortalamasında kaldığı görülmekle birlikte 2061-2100 periyodunda yağışta azalma olmuştur. Kış yağışı gelecek simülasyonunda ise hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryoları için 2026-2060 ve 2061-2100 periyotlarında yağışlar artış olmakla birlikte RCP8.5 senaryosunda artış miktarı daha fazladır.



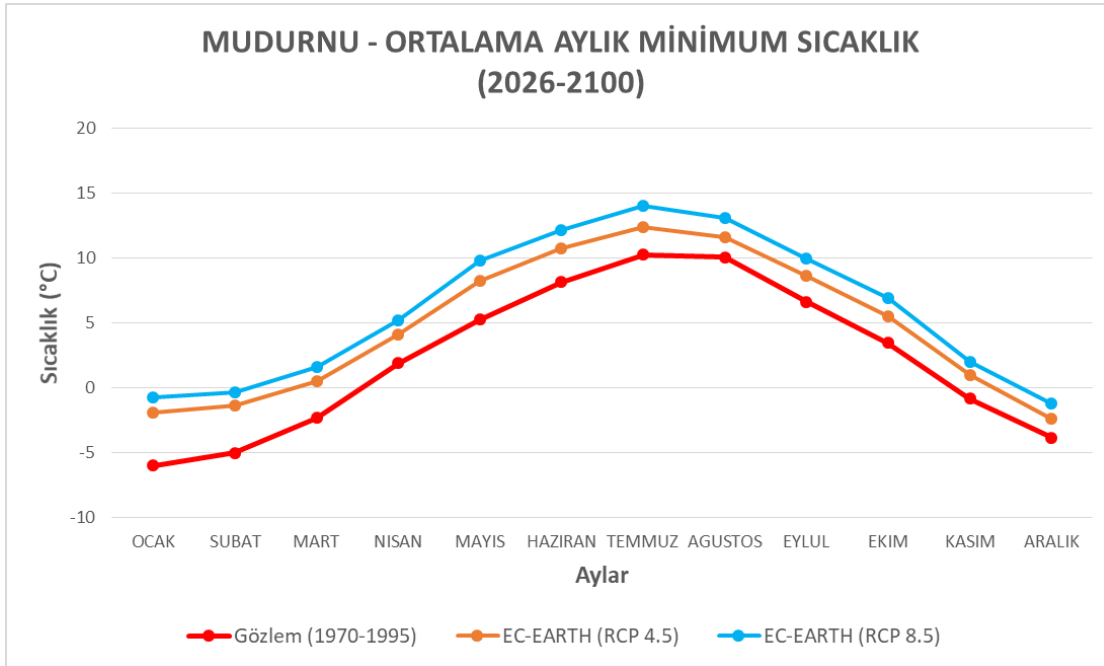
Şekil 4.32. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) yıllık toplam yağış grafiği.

Gözlem verilerine göre gelecek simülasyonunda RCP4.5 senaryosunda 2026-2060 ve 2061-2100 periyotları için genel olarak yağış miktarının yükseldiği, ortalama 40 mm civarında artış olduğu görülmektedir. RCP8.5 senaryosunda ise 2026-2060 periyodunda yağış miktarında gözlem verilerine göre 50 mm artış olmakla birlikte 2061-2100 periyodunda gözlem verilerine göre yağış miktarında az miktarda bir düşüş olmaktadır.

Mudurnu bölgesi için; ortalama aylık maksimum ve minimum sıcaklıklar Şekil 4.33-4.34'te, mevsimsel maksimum ve minimum sıcaklıklar Şekil 4.35-4.42'de, ortalama yıllık maksimum ve minimum sıcaklıklar ise Şekil 4.43-4.44'te gösterilmektedir.

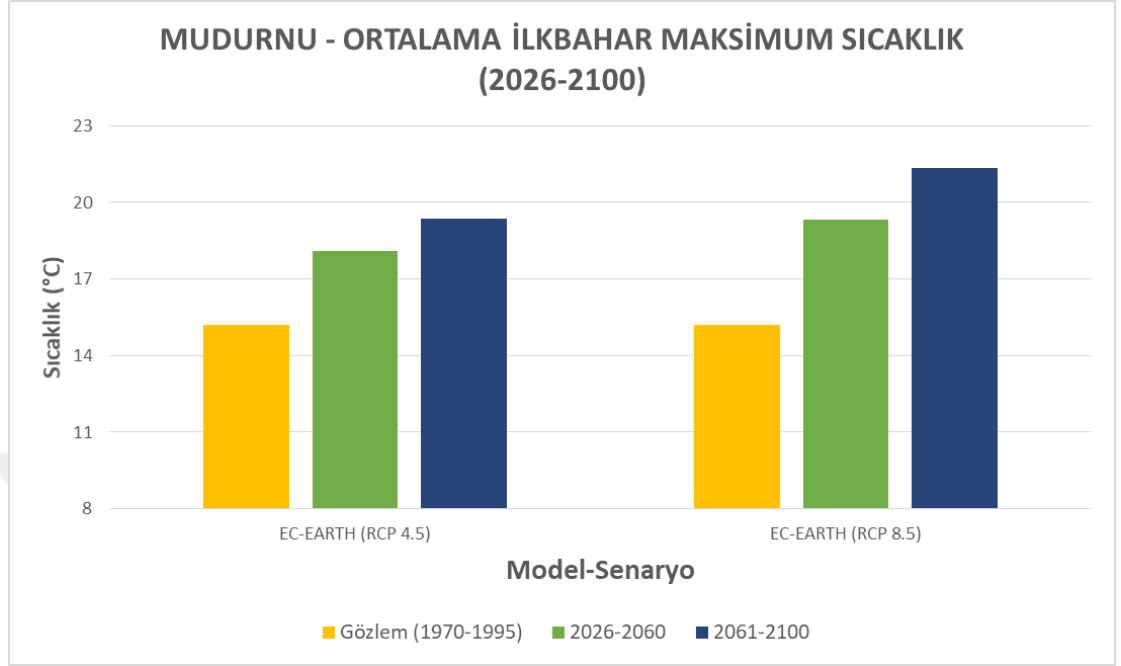


Şekil 4.33. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1970-1995) ortalama aylık maksimum sıcaklık grafiği.

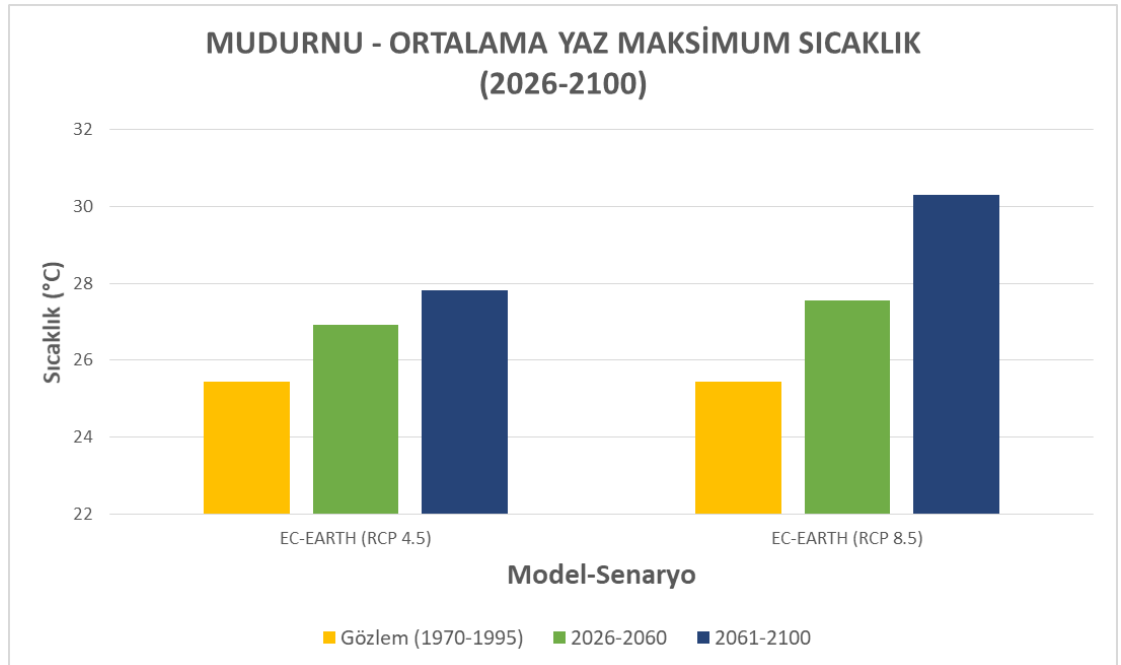


Şekil 4.34. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1970-1995) ortalama aylık minimum sıcaklık grafiği.

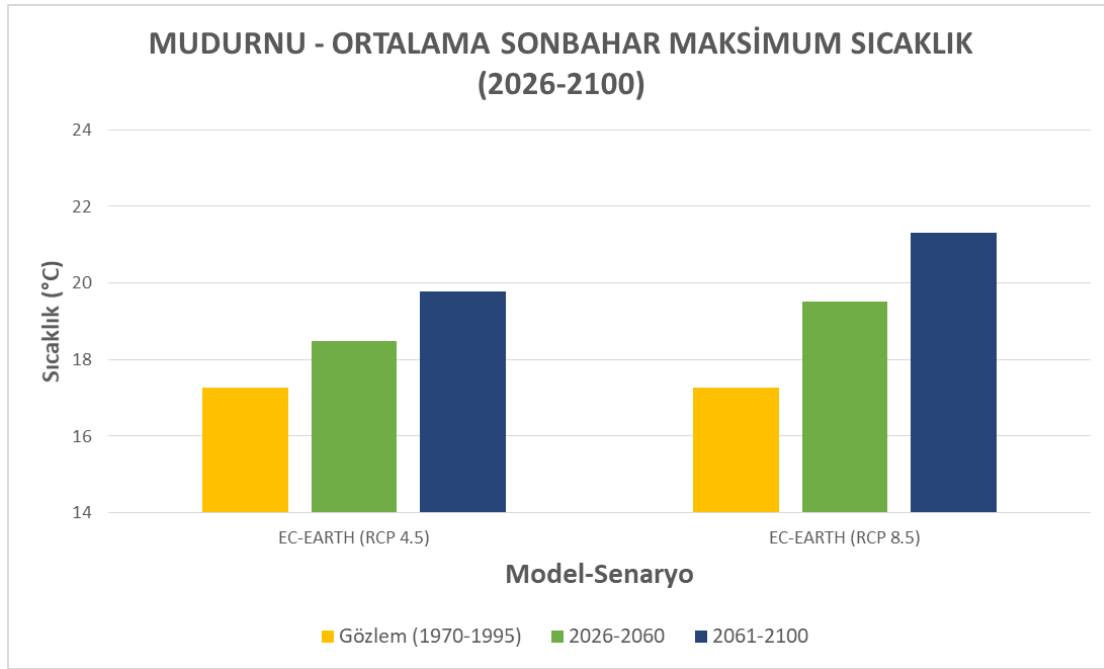
Sıcaklık grafikleri incelendiğinde gözlem verilerine göre RCP8.5 senaryosunda daha fazla olmak üzere aylar için sıcaklıklarda düzenli ve belirgin bir artış olmaktadır.



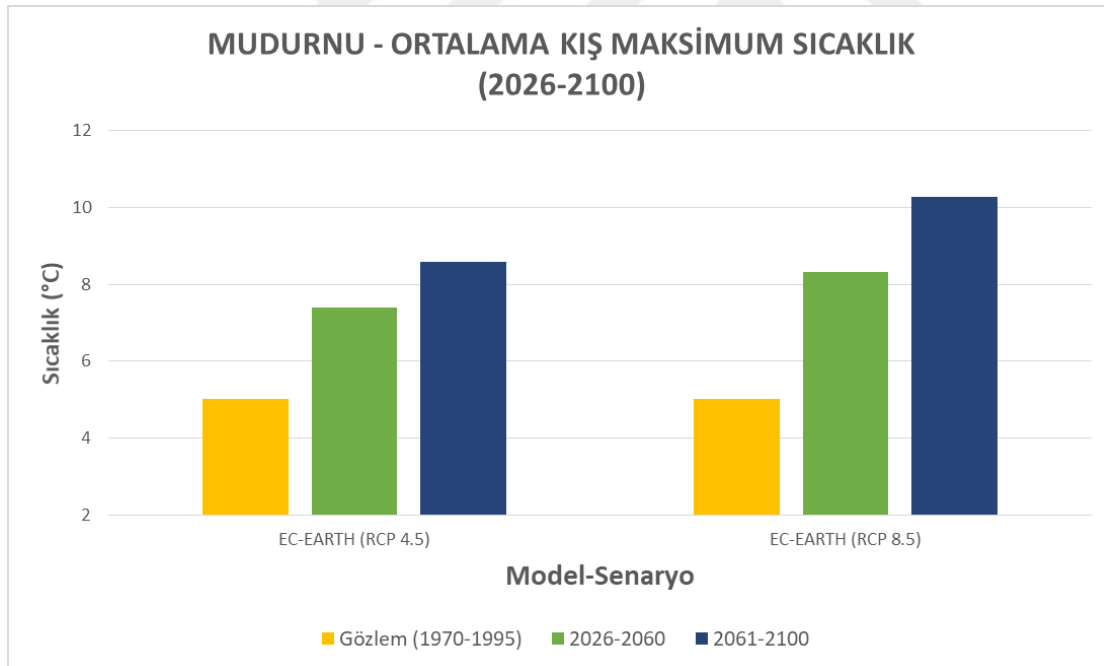
Şekil 4.35. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama ilkbahar maksimum sıcaklık grafiği.



Şekil 4.36. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama yaz maksimum sıcaklık grafiği.



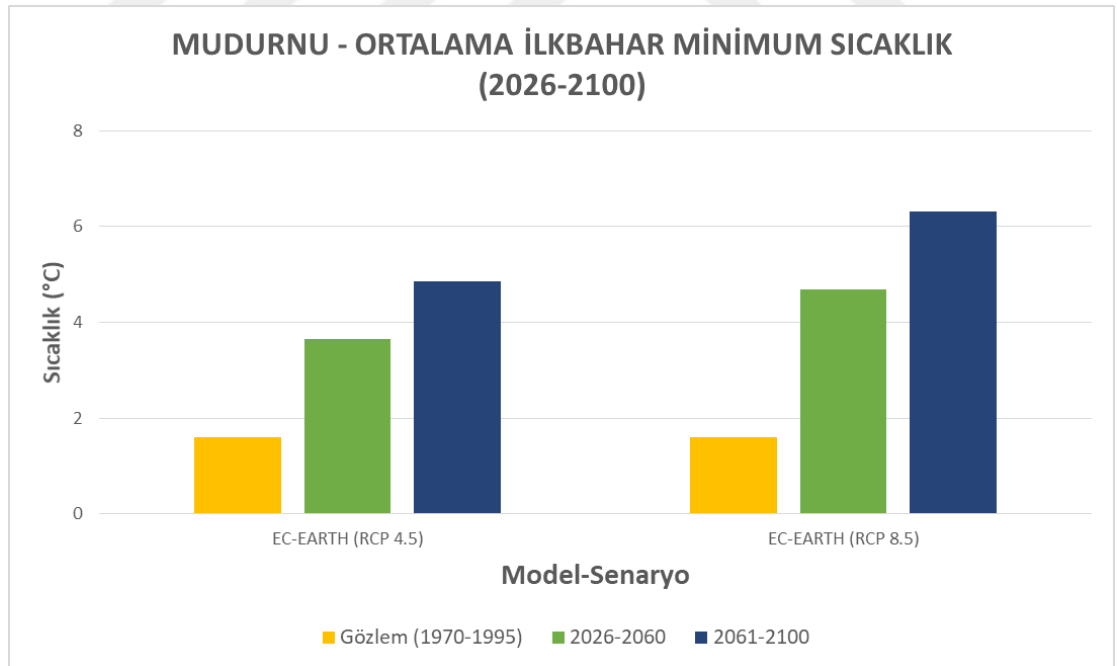
Şekil 4.37. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama sonbahar maksimum sıcaklık grafiği.



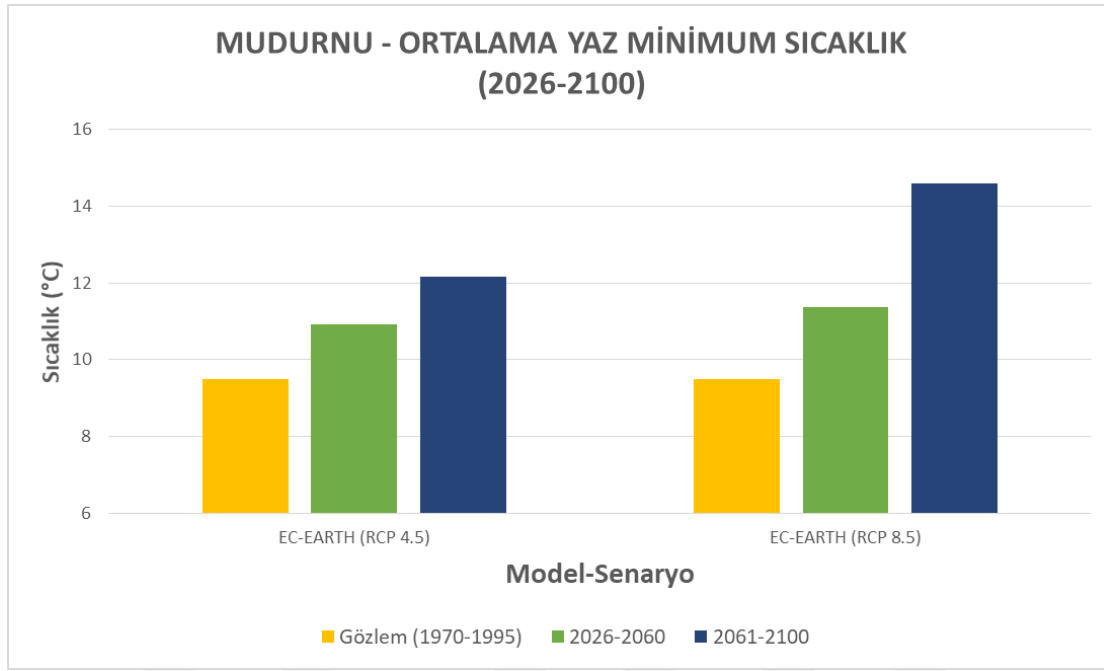
Şekil 4.38. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama kış maksimum sıcaklık grafiği.

Mevsimsel aylık ortalama maksimum sıcaklıklar incelendiğinde gözlem verilerine göre gelecek projeksiyonu ilkbahar maksimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için

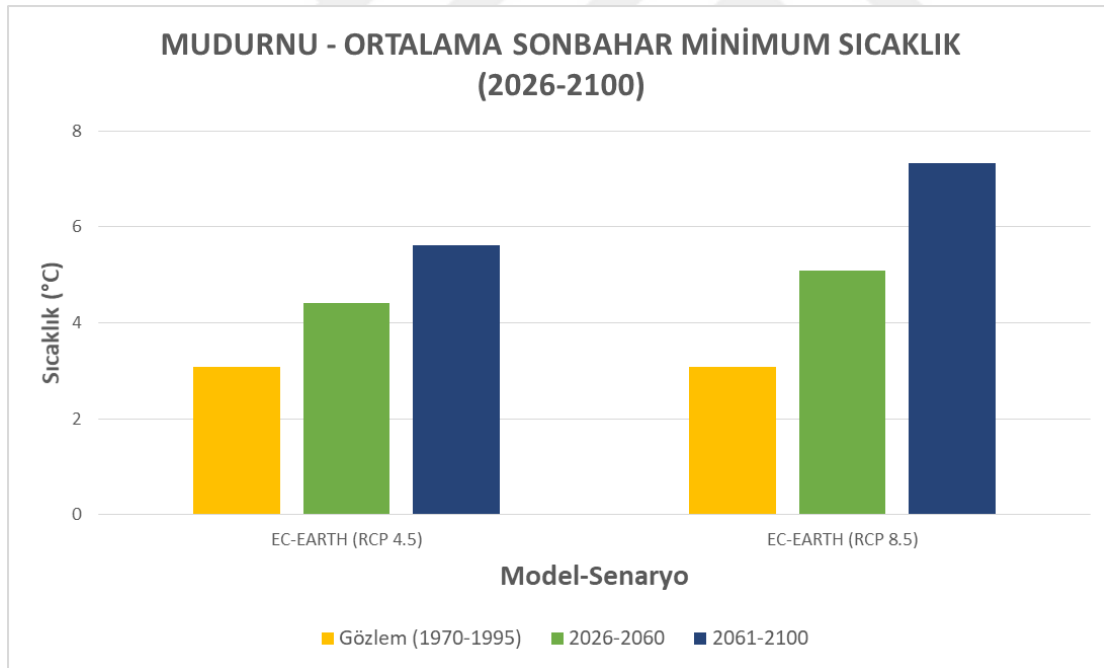
de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda ilkbahar maksimum sıcaklığında yaklaşık 3,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 5 °C artış görülmektedir. Yaz maksimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda yaz maksimum sıcaklığında yaklaşık 2 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3,5 °C artış görülmektedir. Sonbahar maksimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda sonbahar maksimum sıcaklığında yaklaşık 1,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3,5 °C artış görülmektedir. Kış maksimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda kış maksimum sıcaklığında yaklaşık 3 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 4 °C artış görülmektedir.



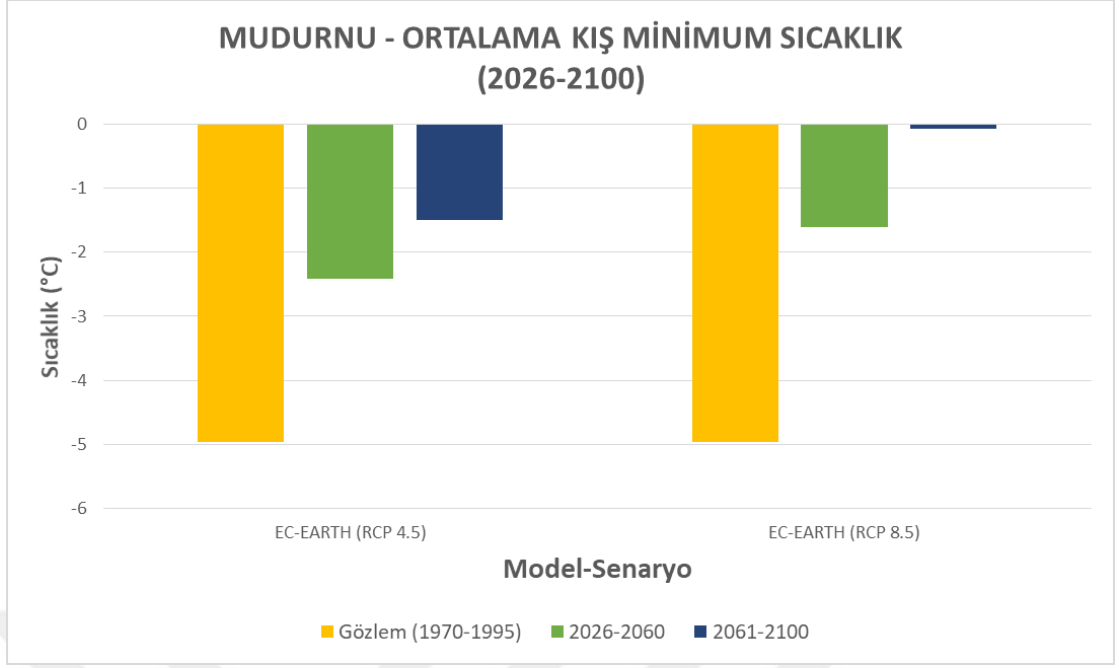
Şekil 4.39. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama ilkbahar minimum sıcaklık grafiği.



Şekil 4.40. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama yaz minimum sıcaklık grafiği.



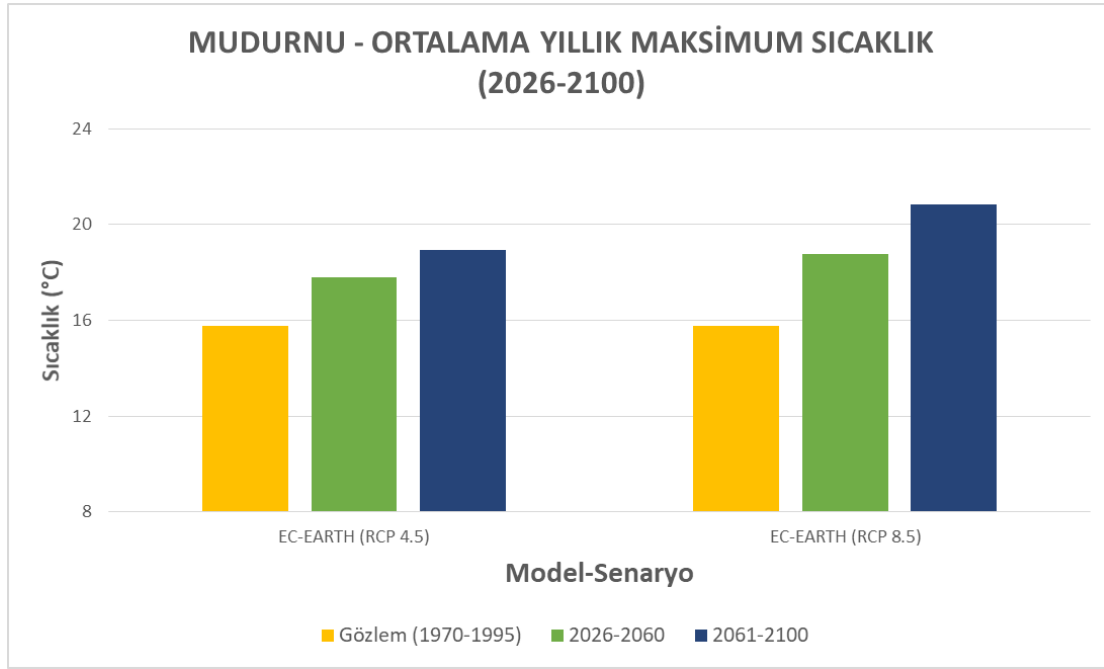
Şekil 4.41. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama sonbahar minimum sıcaklık grafiği.



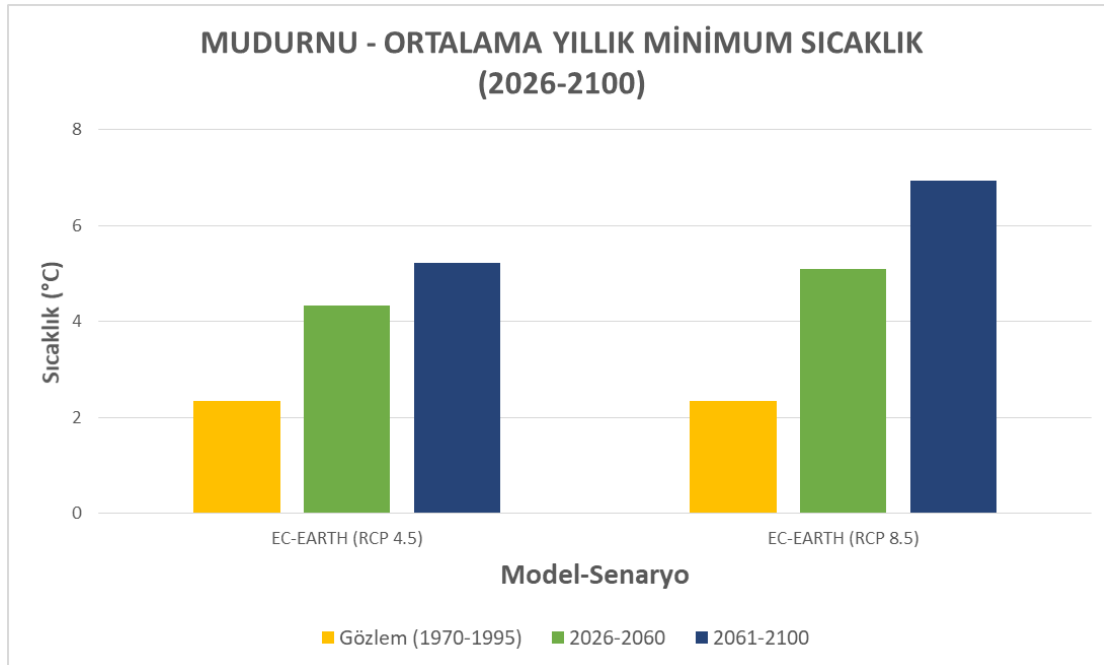
Şekil 4.42. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama kış minimum sıcaklık grafiği.

Mevsimsel aylık ortalama minimum sıcaklıklar incelendiğinde gözlem verilerine göre gelecek projeksiyonu ilkbahar minimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda ilkbahar minimum sıcaklığında yaklaşık 2,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3,5 °C artış görülmektedir. Yaz minimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda yaz minimum sıcaklığında yaklaşık 2 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3,5 °C artış görülmektedir. Sonbahar minimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda sonbahar minimum sıcaklığında yaklaşık 2 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3 °C artış görülmektedir. Kış minimum sıcaklığı RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5

senaryosunda kış minimum sıcaklığında yaklaşık 3 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 4 °C artış görülmektedir.



Şekil 4.43. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama yıllık maksimum sıcaklık grafiği.

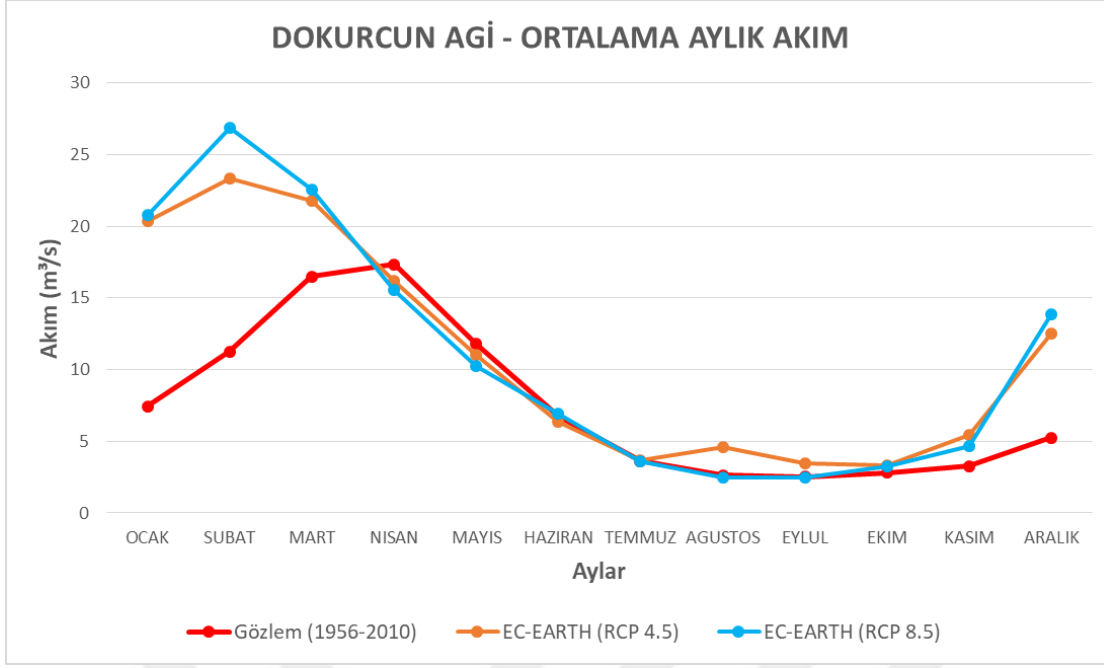


Şekil 4.44. EC-Earth2 modeli, Mudurnu bölgesi RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2060) – (2061-2100) periyotları ile gözlem (1970-1995) ortalama yıllık minimum sıcaklık grafiği.

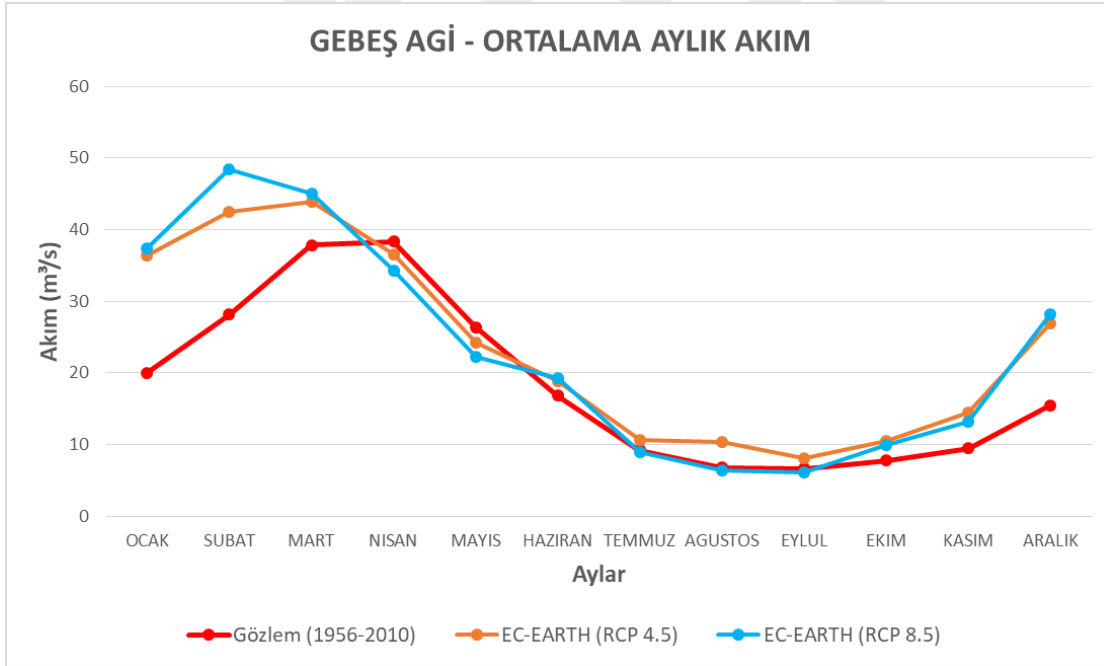
Ortalama yıllık maksimum ve minimum sıcaklıklar incelendiğinde verilerine göre gelecek projeksiyonu ortalama yıllık maksimum sıcaklık RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda ortalama yıllık maksimum sıcaklıkta yaklaşık 2,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 4 °C artış görülmektedir. Ortalama yıllık minimum sıcaklık RCP8.5 değerlerinin, RCP4.5 değerlerine göre daha yüksek olacak şekilde arttığı görülmüştür. Her iki senaryo için de 2061-2100 periyodunda 2026-2060 periyoduna göre daha yüksek artış olmuştur. RCP4.5 senaryosunda ortalama yıllık minimum sıcaklıkta yaklaşık 2,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3,5 °C artış görülmektedir.

4.4. EC-Earth2 İklim Modeli Hidrolojik Sonuçları

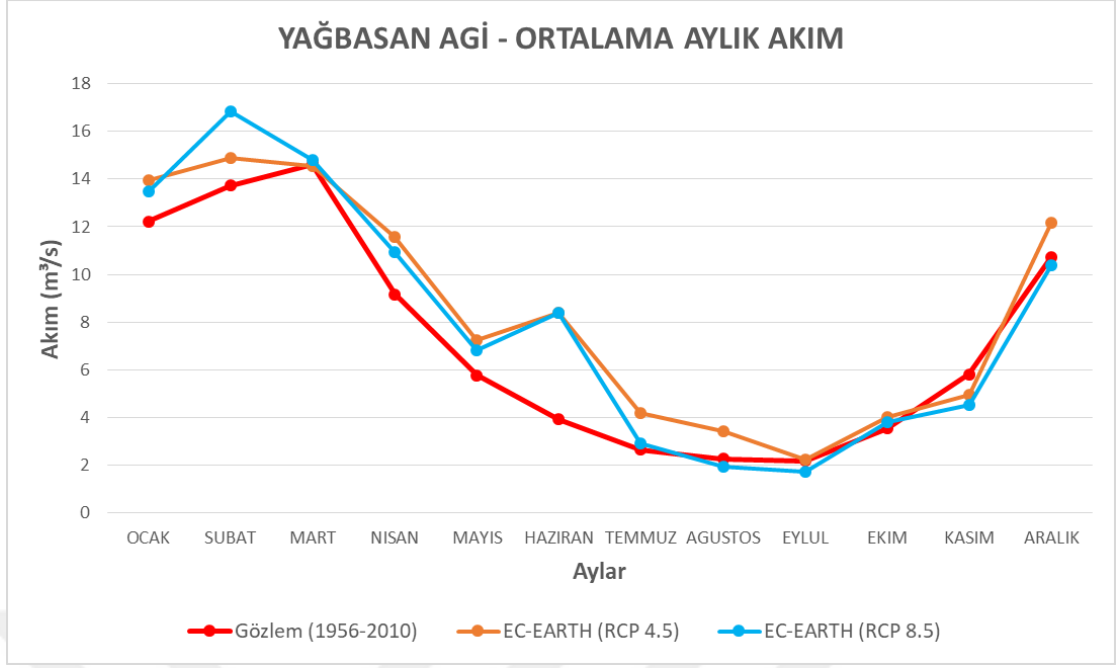
EC-Earth2 modelinin dağılım haritalaması (DM) kullanılarak yanlışlık (bias) düzeltilmesi yapılmış nihai iklim verileri, kalibrasyon ve validasyonu yapılmış SWAT hidrolojik modeline iklim verisi olarak girilerek hidrolojik model 2021-2025 yılları ısınma süresi olmak üzere 2021-2100 periyodu için çalıştırılmış, netice olarak RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre havzada bulunan Dokurcun, Gebeş ve Yağbasan AGİ'lerin bulunduğu noktalar için akım sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar aylık akımlar için 2026-2100 periyodunda, mevsimsel ve yıllık akımlar ise 2026-2060 ve 2061-2100 periyotlarına göre analiz edilmiştir. Kıyaslama yapılması amacıyla Dokurcun, Gebeş ve Yağbasan AGİ'lerin 1956-2010 periyodu gözlem verileri de grafiklere eklenmiştir. Ölçümleri 1972 yılından başlayan Gebeş AGİ verileri, Bölüm 3.3.2.4. Meteorolojik Veriler'de açıklandığı şekilde Dokurcun AGİ'ye göre yapılan regresyon analizi ile uzatılmıştır. Dokurcun AGİ ortalama aylık akımları Şekil 4.45'te, Gebeş AGİ ortalama aylık akımları Şekil 4.46'da, Yağbasan AGİ ortalama aylık akımları Şekil 4.47'de gösterilmektedir. Ortalama aylık akımlarda gözlem verilerine göre RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları için yaşanan değişimler Dokurcun AGİ için Tablo 4.10'da, Gebeş AGİ için Tablo 4.11'de ve Yağbasan AGİ için Tablo 4.12'de gösterilmektedir. Mevsimsel ortalama akımlar Dokurcun AGİ için Şekil 4.48-4.51'de, Gebeş AGİ için Şekil 4.52-4.55'te, Yağbasan AGİ için Şekil 4.56-4.59'da gösterilmektedir. Yıllık ortalama akımlar ise Dokurcun AGİ için Şekil 4.60'da, Gebeş AGİ için Şekil 4.61'de, Yağbasan AGİ için Şekil 4.62'de gösterilmektedir.



Şekil 4.45. EC-Earth2 modeli, Dokurcun AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama aylık akım grafiği.



Şekil 4.46. EC-Earth2 modeli, Gebeş AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama aylık akım grafiği.



Şekil 4.47. EC-Earth2 modeli, Yağbasan AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama aylık akım grafiği.

Tablo 4.10. Dokurcun AGİ ortalama aylık akımları ve değişimleri.

Aylar	Gözlem (1956-2010) (m³/s)	RCP4.5 (2026-2100) (m³/s)	RCP8.5 (2026-2100) (m³/s)	Değişim Oranı (RCP4.5)	Değişim Oranı (RCP8.5)
Ocak	7,45	20,39	20,76	174%	179%
Şubat	11,25	23,32	26,87	107%	139%
Mart	16,49	21,78	22,59	32%	37%
Nisan	17,36	16,18	15,55	-7%	-10%
Mayıs	11,79	11,06	10,28	-6%	-13%
Haziran	6,74	6,33	6,94	-6%	3%
Temmuz	3,63	3,65	3,63	1%	0%
Ağustos	2,62	4,58	2,50	75%	-5%
Eylül	2,51	3,43	2,44	37%	-3%
Ekim	2,83	3,34	3,28	18%	16%
Kasım	3,27	5,48	4,70	68%	44%
Aralık	5,27	12,54	13,86	138%	163%

Tablo 4.11. Gebeş AGİ ortalama aylık akımları ve değişimleri.

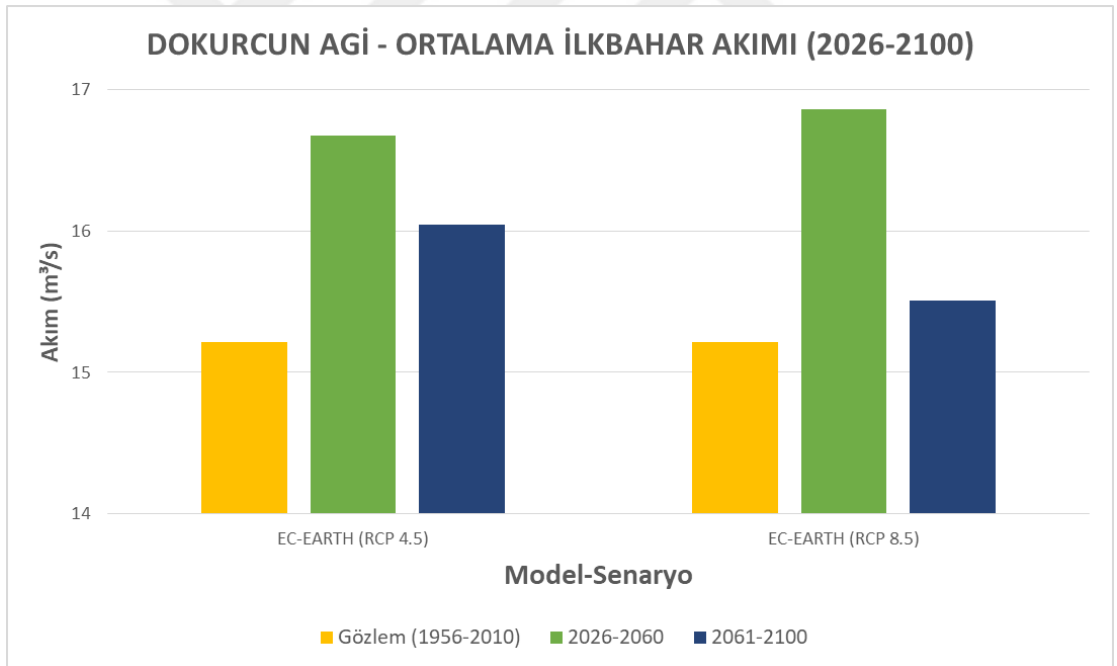
Aylar	Gözlem (1956-2010) (m ³ /s)	RCP4.5 (2026-2100) (m ³ /s)	RCP8.5 (2026-2100) (m ³ /s)	Değişim Oranı (RCP4.5)	Değişim Oranı (RCP8.5)
Ocak	20,04	36,38	37,38	82%	87%
Şubat	28,15	42,54	48,45	51%	72%
Mart	37,82	43,95	44,98	16%	19%
Nisan	38,33	36,47	34,22	-5%	-11%
Mayıs	26,38	24,24	22,24	-8%	-16%
Haziran	16,82	18,79	19,22	12%	14%
Temmuz	9,18	10,62	9,02	16%	-2%
Ağustos	6,83	10,34	6,42	51%	-6%
Eylül	6,67	8,04	6,09	21%	-9%
Ekim	7,76	10,51	9,88	36%	27%
Kasım	9,45	14,42	13,24	52%	40%
Aralık	15,50	26,97	28,18	74%	82%

Tablo 4.12. Yağbasan AGİ ortalama aylık akımları ve değişimleri.

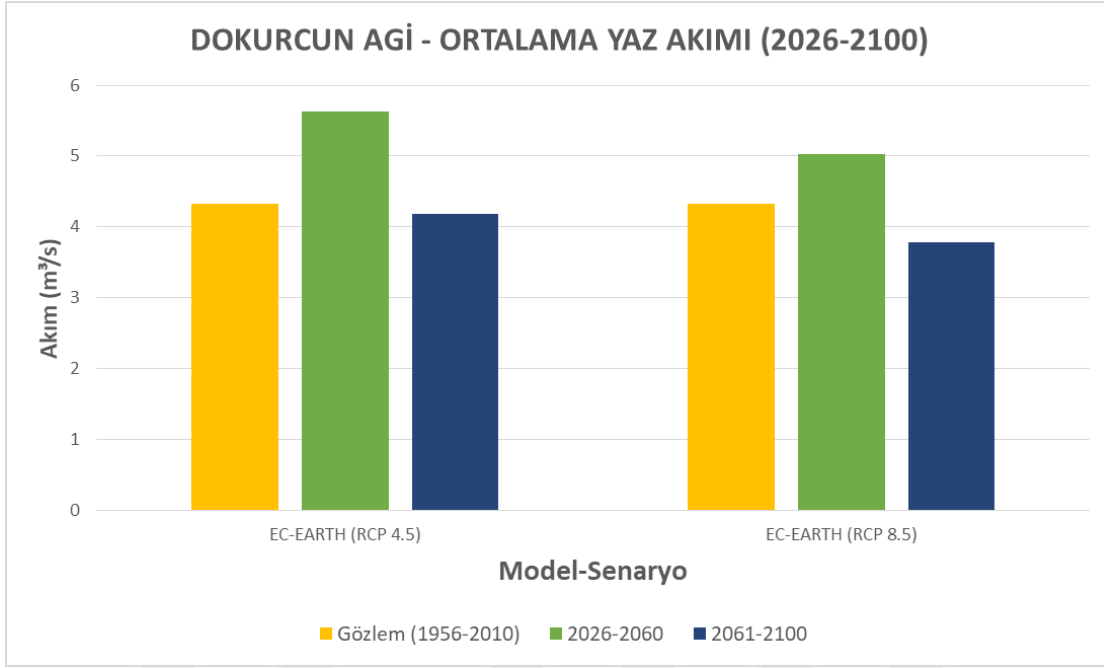
Aylar	Gözlem (1956-2010) (m ³ /s)	RCP4.5 (2026-2100) (m ³ /s)	RCP8.5 (2026-2100) (m ³ /s)	Değişim Oranı (RCP4.5)	Değişim Oranı (RCP8.5)
Ocak	12,22	13,93	13,48	14%	10%
Şubat	13,73	14,90	16,82	8%	22%
Mart	14,61	14,56	14,80	0%	1%
Nisan	9,17	11,58	10,95	26%	19%
Mayıs	5,77	7,25	6,81	26%	18%
Haziran	3,92	8,39	8,41	114%	115%
Temmuz	2,65	4,20	2,90	58%	9%
Ağustos	2,26	3,44	1,93	52%	-15%
Eylül	2,18	2,23	1,75	2%	-20%
Ekim	3,54	4,00	3,81	13%	8%
Kasım	5,82	4,94	4,54	-15%	-22%
Aralık	10,71	12,17	10,37	14%	-3%

Ortalama aylık akımlar incelendiğinde RCP4.5 senaryosunda Dokurcun AGİ için Aralık-Mart ayları arası sulak dönemde akımlarda ortalama %113 (10 m³/s) artış

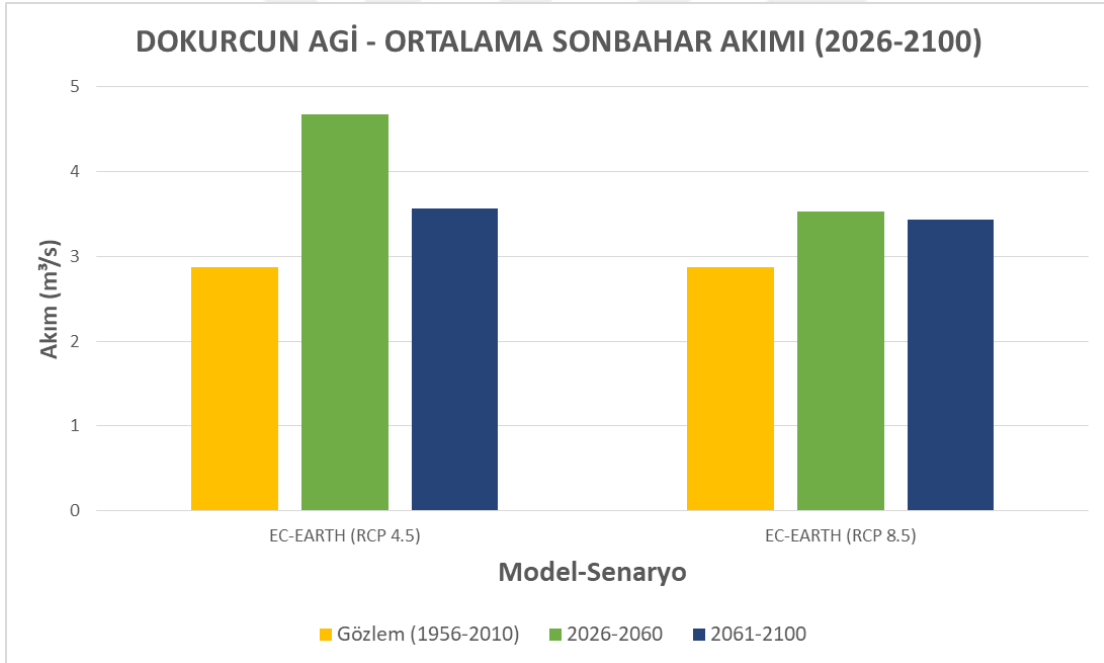
görülmekteyken RCP8.5 senaryosunda bu oran %130 (11 m³/s) olmaktadır. RCP4.5'te Nisan, Mayıs ve Haziran aylarında küçük bir miktar düşüş ile birlikte Ağustos-Kasım aralığında %50 (1,5 m³/s) artış gözlenmiştir. RCP8.5 senaryosu için Nisan-Eylül aralığında küçük bir miktar düşüş ile birlikte Ekim-Kasım aylarında %30 (1 m³/s) artış gözlenmektedir. Gebeş AGİ için RCP4.5 senaryosunda Aralık-Mart ayları arası sulak dönemde akımlarda ortalama %56 (12 m³/s) artış görülmekteyken RCP8.5 senaryosunda bu oran %65 (15 m³/s) olmaktadır. RCP4.5'te Nisan ve Mayıs aylarında küçük bir miktar düşüş ile birlikte Haziran-Kasım aralığında %31 (3 m³/s) artış gözlenmiştir. RCP8.5 senaryosu için Nisan-Eylül aylarında küçük bir miktar düşüş ile birlikte Ekim-Kasım aylarında %34 (3 m³/s) artış gözlenmektedir. Yağbasan AGİ için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarında Aralık-Mart ayları arası sulak dönemde akımlarda ortalama %9 (1 m³/s) artış olmaktadır. RCP4.5'te Nisan-Kasım aralığında %35 (1,5 m³/s) artış görülmekte, RCP8.5'te Nisan-Temmuz aralığında %40 (2 m³/s) artmaktayken Ağustos-Kasım aralığında ise %12 (0,5 m³/s) düşüş görülmektedir.



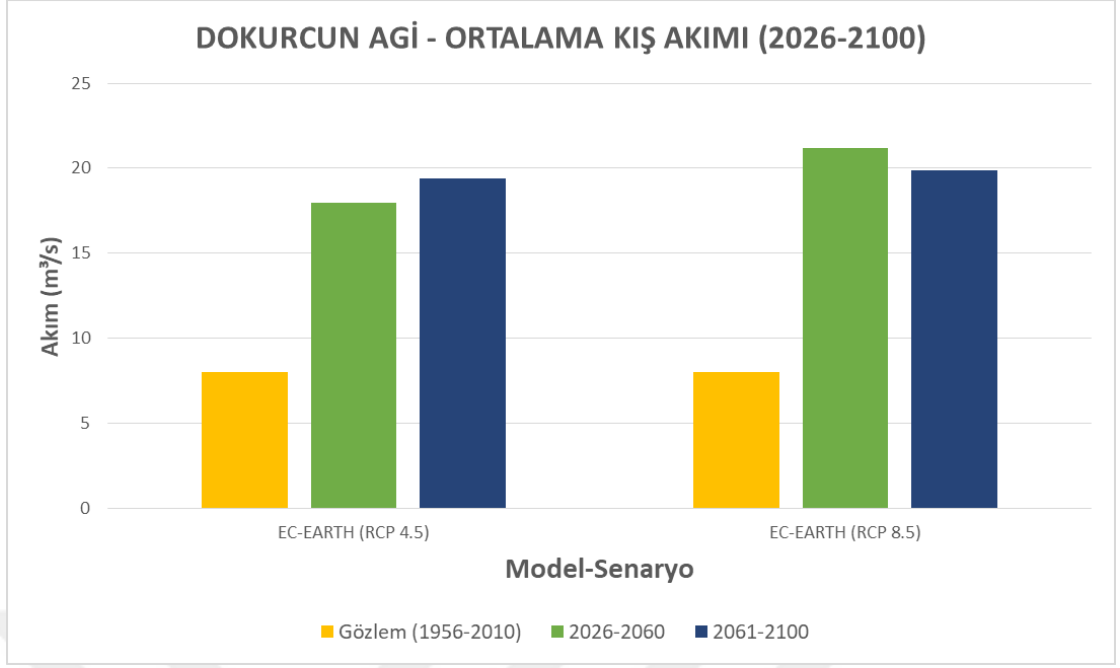
Şekil 4.48. EC-Earth2 modeli, Dokurcun AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama ilkbahar akım grafiği.



Şekil 4.49. EC-Earth2 modeli, Dokurcun AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama yaz akım grafiği.

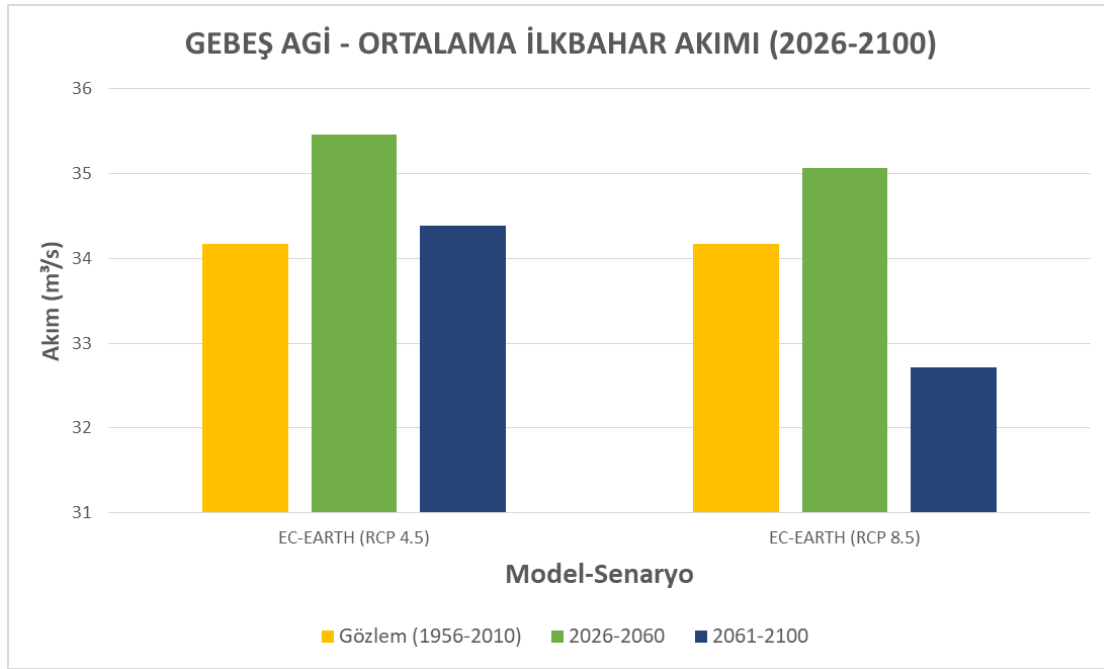


Şekil 4.50. EC-Earth2 modeli, Dokurcun AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama sonbahar akım grafiği.

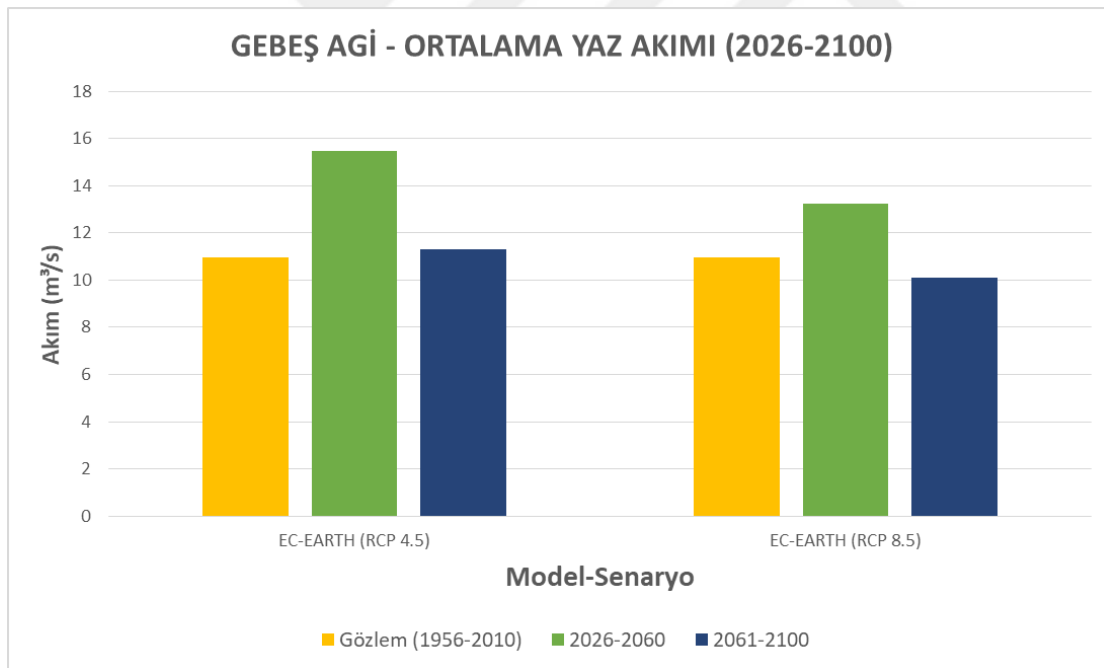


Şekil 4.51. EC-Earth2 modeli, Dokurcun AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama kış akım grafiği.

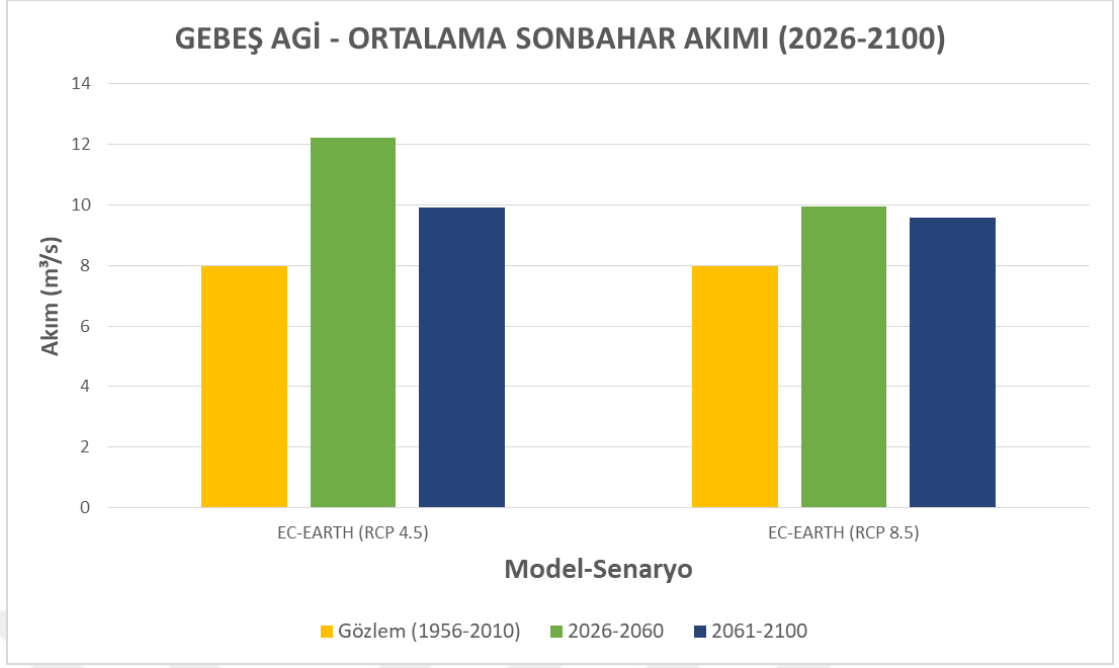
Dokurcun AGİ için mevsimsel akımlar incelendiğinde gözlem verilerine göre gelecek simülasyonunda ilkbahar akımında hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryosunda 2026-2060 periyodunda artış olmakla birlikte, 2061-2100 periyodunda artış miktarı daha az olmuştur. Yaz akımı gelecek simülasyonunda hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryosu için 2026-2060 arasında gözlem verilerine göre artış görülmekle birlikte 2061-2100 periyodunda gözlem verilerinden daha düşük akımlar görülmektedir. Sonbahar akımı gelecek simülasyonunda RCP4.5 senaryosu için 2026-2060 periyodunda gözlem verilerine göre artış olmakla birlikte 2061-2100 periyodunda artış miktarı daha az olmaktadır. RCP8.5 senaryosunda 2026-2060 ve 2061-2100 periyotlarında gözlem verilerine göre akımda yaklaşık aynı miktarda bir artış görülmektedir. Kış akımı gelecek simülasyonunda ise hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryoları için 2026-2060 ve 2061-2100 periyotlarında akımlarda ciddi şekilde artış olmakla birlikte RCP8.5 senaryosunda artış miktarı nispeten daha fazladır.



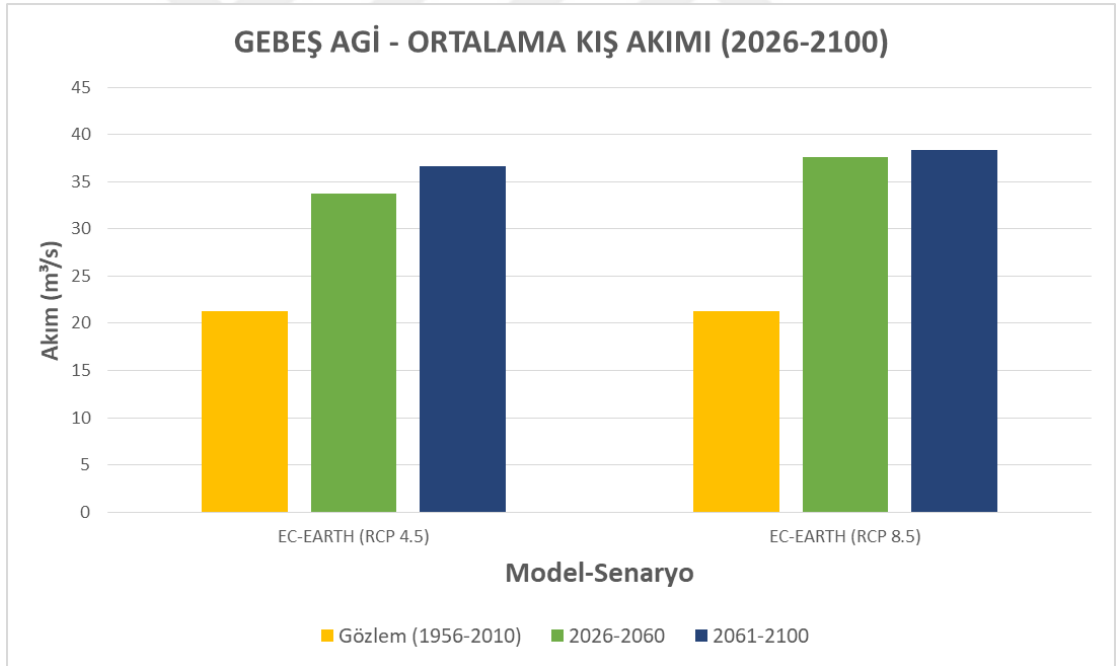
Şekil 4.52. EC-Earth2 modeli, Gebeş AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama ilkbahar akım grafiği.



Şekil 4.53. EC-Earth2 modeli, Gebeş AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama yaz akım grafiği.



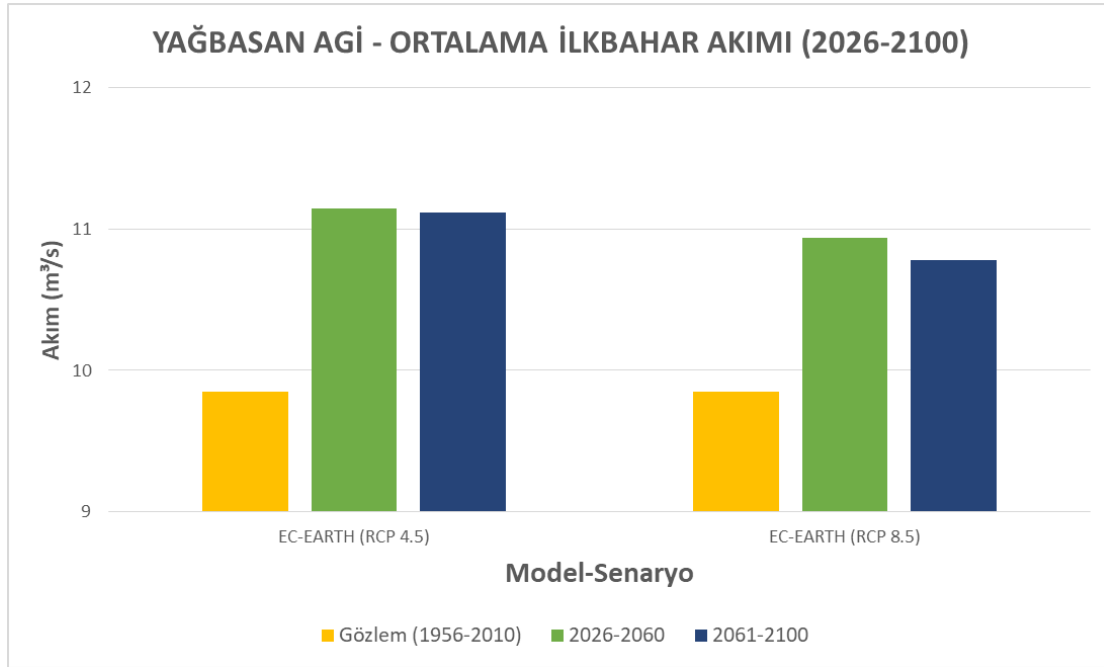
Şekil 4.54. EC-Earth2 modeli, Gebeş AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama sonbahar akım grafiği.



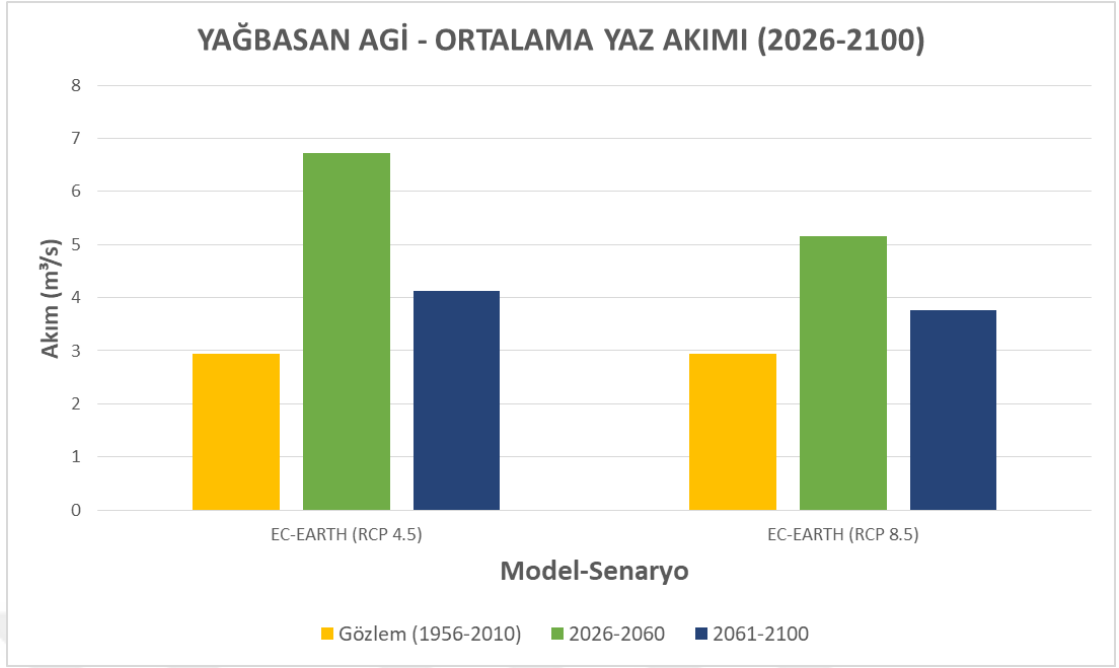
Şekil 4.55. EC-Earth2 modeli, Gebeş AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama kış akım grafiği.

Gebeş AGİ için mevsimsel akımlar incelendiğinde gözlem verilerine göre gelecek simülasyonunda ilkbahar akımında RCP4.5 senaryosunda 2026-2060 periyodunda artış olmakla birlikte, 2061-2100 periyodunda artış miktarı daha az olmuştur. RCP8.5 senaryosunda ise 2026-2060 periyodunda artış olmakla birlikte, 2061-2100 periyodunda gözlem verilerinden daha düşük akım gözlenmiştir. Yaz akımı gelecek

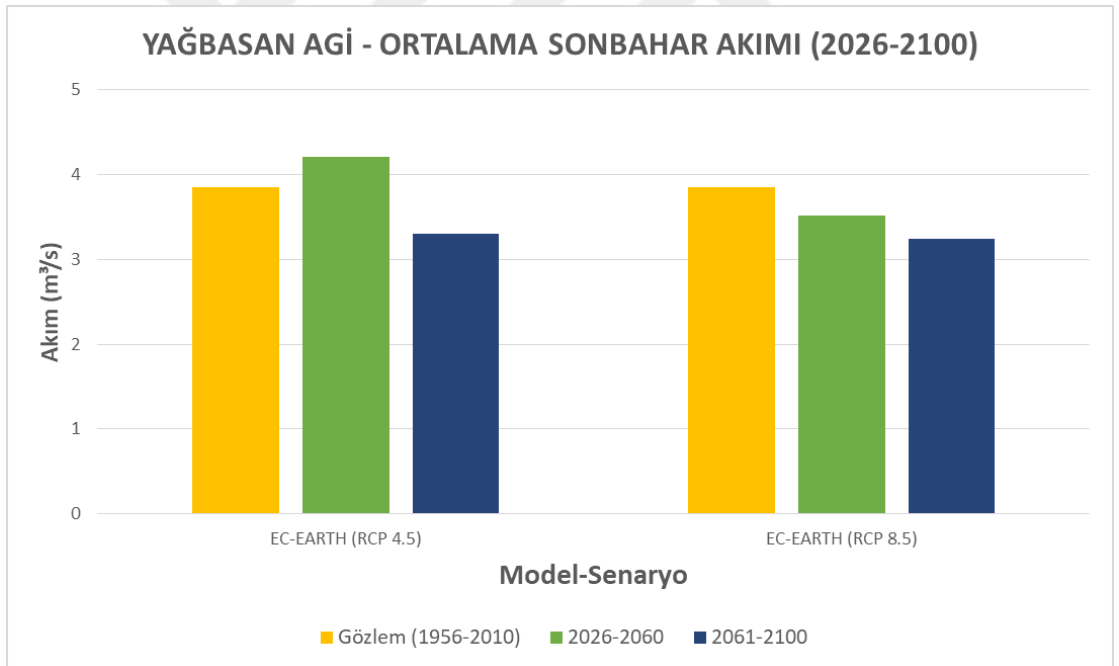
simülasyonunda hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryosu için 2026-2060 arasında gözlem verilerine göre artış görülmekle birlikte 2061-2100 periyodunda gözlem verilerine benzer akımlar görülmektedir. Sonbahar akımı gelecek simülasyonunda RCP4.5 senaryosu için 2026-2060 periyodunda gözlem verilerine göre artış olmakla birlikte 2061-2100 periyodunda artış miktarı daha az olmaktadır. RCP8.5 senaryosunda 2026-2060 ve 2061-2100 periyotlarında gözlem verilerine göre akımda yaklaşık aynı miktarda bir artış görülmektedir. Kış akımı gelecek simülasyonunda ise hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryoları için 2026-2060 ve 2061-2100 periyotlarında akımlarda ciddi şekilde artış olmakla birlikte RCP8.5 senaryosunda artış miktarı nispeten daha fazladır.



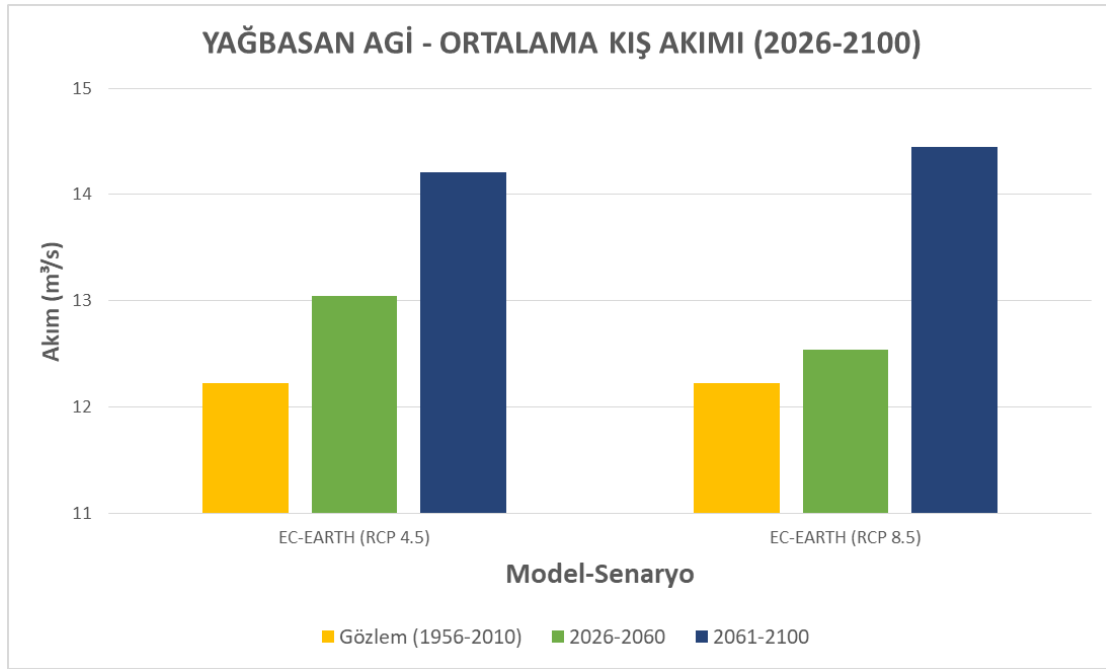
Şekil 4.56. EC-Earth2 modeli, Yağbasan AĞI RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama ilkbahar akım grafiği.



Şekil 4.57. EC-Earth2 modeli, Yağbasan AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama yaz akım grafiği.

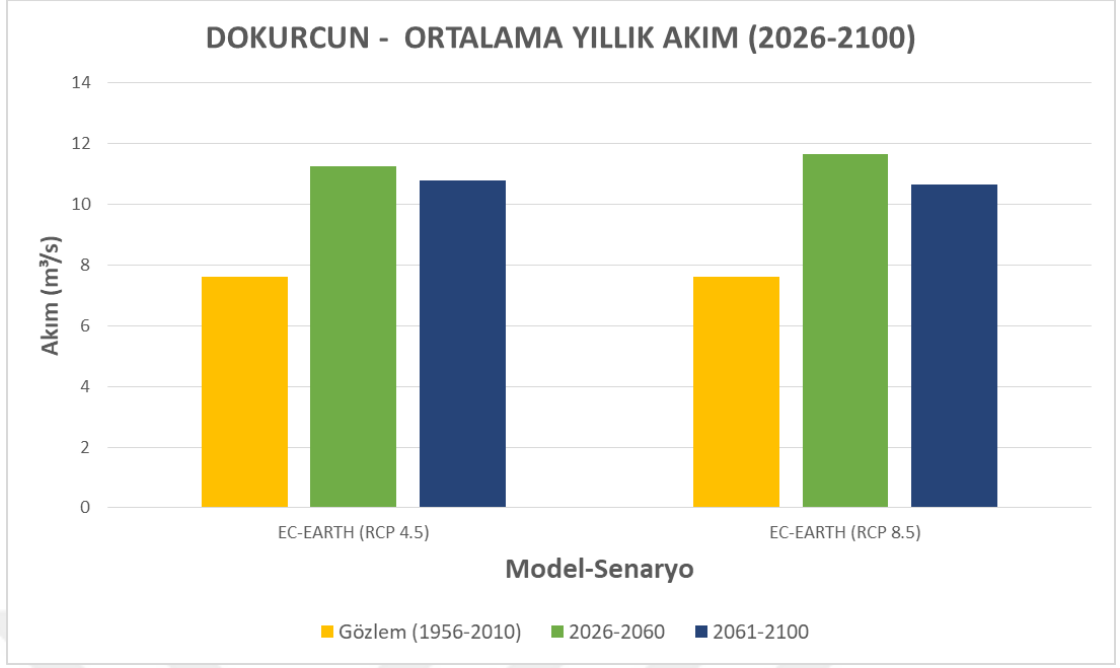


Şekil 4.58. EC-Earth2 modeli, Yağbasan AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama sonbahar akım grafiği.

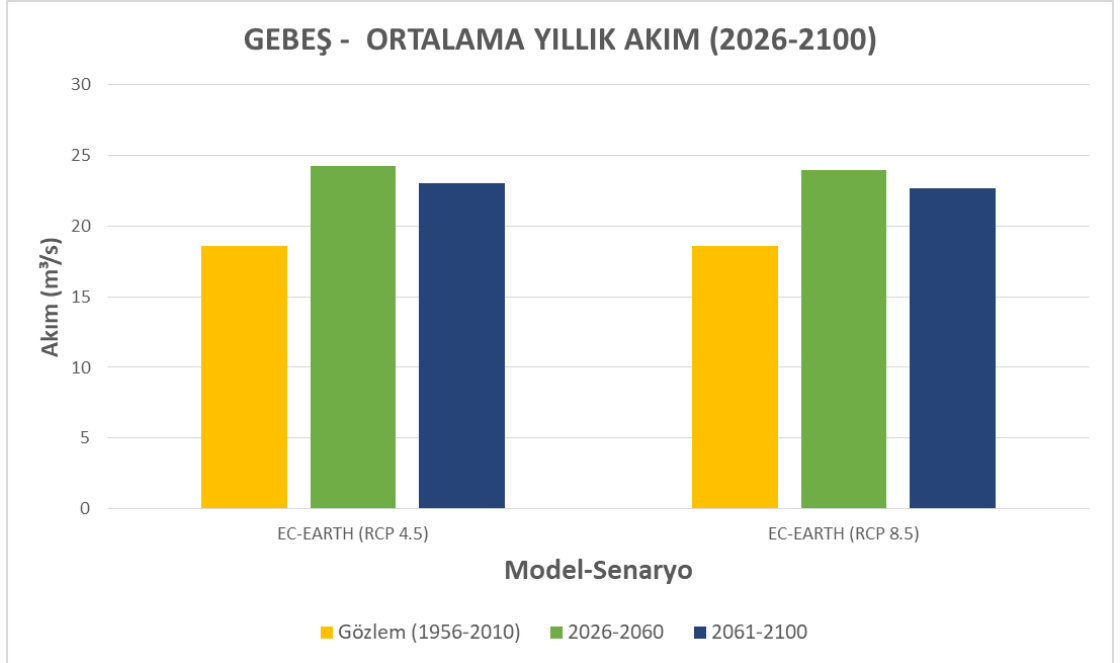


Şekil 4.59. EC-Earth2 modeli, Yağbasan AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama kış akım grafiği.

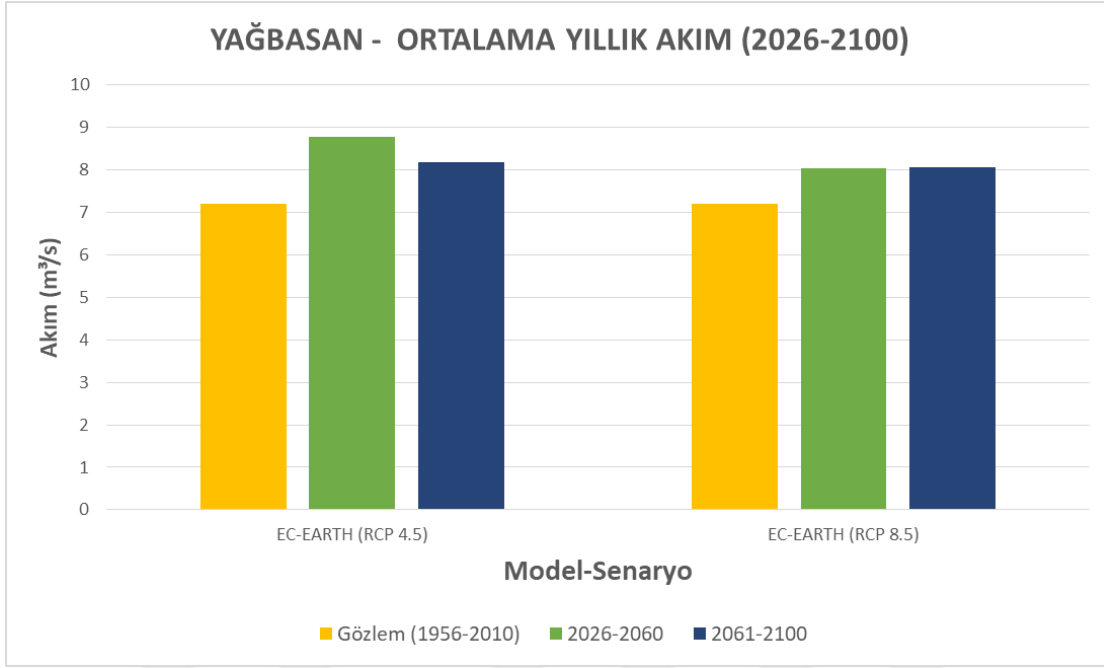
Yağbasan AGİ için mevsimsel akımlar incelendiğinde gözlem verilerine göre gelecek simülasyonunda ilkbahar akımında RCP4.5 senaryosunda 2026-2060 ve 2061-2100 periyodunda akımda yaklaşık aynı oranda artış olmuştur. RCP8.5 senaryosunda ise 2026-2060 periyodunda artış olmakla birlikte, 2061-2100 periyodunda nispeten daha düşük bir artış gözlenmiştir. Yaz akımı gelecek simülasyonunda hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryosu için 2026-2060 arasında gözlem verilerine göre artış görülmekle birlikte 2061-2100 periyodunda nispeten daha az artış görülmektedir. RCP4.5 akımları RCP8.5 senaryosuna göre daha yüksektir. Sonbahar akımı gelecek simülasyonunda RCP4.5 senaryosu için 2026-2060 periyodunda gözlem verilerine göre bir miktar artış olmakla birlikte 2061-2100 periyodunda gözlem verilerinden daha düşük bir akım gözlenmiştir. RCP8.5 senaryosunda 2026-2060 ve 2061-2100 periyotlarında gözlem verilerine göre akımda artan oranda düşüş görülmektedir. Kış akımı gelecek simülasyonunda ise hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryoları için 2026-2060 periyodu için bir miktar artış görülmekle birlikte 2061-2100 periyodunda her iki senaryo için de akımlarda daha yüksek bir artış görülmektedir.



Şekil 4.60. EC-Earth2 modeli, Dokurcun AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama yıllık akım grafiği.



Şekil 4.61. EC-Earth2 modeli, Gebeş AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama yıllık akım grafiği.



Şekil 4.62. EC-Earth2 modeli, Yağbasan AGİ RCP4.5 ve RCP8.5 (2026-2100) ile gözlem (1956-2010) ortalama yıllık akım grafiği.

1956-2010 periyodu gözlem verilerine göre gelecek simülasyonunda Dokurcun AGİ için; RCP4.5 senaryosunda 2026-2060 ve 2061-2100 periyotlarında için genel olarak yıllık ortalama akım miktarında yaklaşık 3 m³/s artış olduğu görülmektedir. RCP8.5 senaryosunda ise yıllık ortalama akım miktarında 2026-2060 periyodunda yaklaşık 4 m³/s, 2061-2100 periyodunda ise yaklaşık 3 m³/s artış olduğu görülmektedir. Gebeş AGİ için; RCP4.5 senaryosunda 2026-2060 periyodunda yaklaşık 5,5 m³/s, 2061-2100 periyodunda ise yaklaşık 4,5 m³/s artış olduğu görülmektedir. RCP8.5 senaryosunda yıllık ortalama akım miktarında 2026-2060 periyodunda yaklaşık 5 m³/s, 2061-2100 periyodunda ise yaklaşık 4 m³/s artış gözlenmektedir. Yağbasan AGİ için; RCP4.5 senaryosunda 2026-2060 periyodunda yaklaşık 1,5 m³/s, 2061-2100 periyodunda ise yaklaşık 1 m³/s artış olduğu görülmektedir. RCP8.5 senaryosunda yıllık ortalama akım miktarında 2026-2060 ve 2061-2100 periyotlarında yaklaşık 1 m³/s artış gözlenmektedir.

5. DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER

Mudurnu havzasının SWAT programı üzerinde kurulan hidrolojik modeli, ilk 3 yılı ısınma süresi olmak üzere 1978-1995 periyodunda havzayı temsil eden Sakarya ve Mudurnu MGİ iklim verileri ile çalıştırılmış, modelin verdiği akım sonuçlarının havzada bulunan Dokurcun, Gebeş ve Yağbasan AGİ akım ölçümleri ile SWAT-CUP programı vasıtasıyla kalibrasyonu ve validasyonunun yapılması neticesinde kurulan hidrolojik model, performans skor ve dereceleri olarak kalibrasyonda Dokurcun AGİ için; $R^2=0.87$, $NSE=0.87$, $PBIAS=3.7$, $RSR=0.37$ ve “çok iyi”, Gebeş AGİ için; $R^2=0.91$, $NSE=0.91$, $PBIAS=-4.0$, $RSR=0.30$ ve “çok iyi”, Yağbasan AGİ için; $R^2=0.80$, $NSE=0.80$, $PBIAS=-2.5$, $RSR=0.45$ “iyi” ve “çok iyi”, validasyonda ise Dokurcun AGİ için; $R^2=0.80$, $NSE=0.78$, $PBIAS=-7.8$, $RSR=0.47$ “iyi” ve “çok iyi”, Gebeş AGİ için; $R^2=0.87$, $NSE=0.87$, $PBIAS=-3.6$, $RSR=0.36$ ve “çok iyi”, Yağbasan AGİ için; $R^2=0.72$, $NSE=0.71$, $PBIAS=-11.8$, $RSR=0.54$ “tatmin edici” ve “iyi” olmak üzere oldukça başarılı sonuçlar almıştır. Oluşturulan bu başarılı hidrolojik model, havzada iklim değişikliğinin etkilerini analiz etmek amacıyla kullanılmıştır. Gelecek iklim projeksiyonunu havzaya uygulamak amacıyla Avrupa Konsorsiyumu tarafından geliştirilen EC-Earth2 iklim modelinin EURO-CORDEX projesi kapsamında RCA4 bölgesel iklim modeli ile ölçeği küçültülmüş gelecek 2021-2100 periyodu RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarının verileri yanlışlıklardan (bias) arındırılmak için düzeltme işlemine tabi tutulmuştur. Yanlılık (bias) düzeltme yöntemi olarak yağış için dört yöntem, sıcaklık için ise üç yöntem kullanılmıştır. İklim modelinin 1970-1995 periyodu tarihsel yağış ve sıcaklık verileri ile her bir MGİ istasyonunun 1970-1995 periyodu gözlem yağış ve sıcaklık verileri kullanılarak her istasyon için bu yöntemlere göre yanlılığı (bias) düzeltilmiş iklim verileri elde edilmiştir. Bu yöntemlerden her bir istasyon ve parametre için hangi yöntemin daha iyi sonuçlar verdiğini analiz etmek amacıyla yağış için 6 adet, sıcaklık için 4 adet iklim indisi kullanılmış, yanlılık (bias) düzeltme yöntemlerinin düzeltilmiş tarihsel verileri ile gözlem verileri kıyaslanarak her iki MGİ için de hem yağış hem de sıcaklık parametreleri açısından en iyi sonucu veren yanlılık (bias) düzeltme yönteminin dağılım haritalaması (DM) olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen 2026-2100 periyodu gelecek projeksiyonu RCP4.5 ve RCP8.5

senaryoları iklim modeli verileri aylık zaman diliminde aynı periyotta, mevsimsel ve yıllık zaman diliminde ise 2026-2060 ile 2061-2100 periyotlarında analiz edilmiştir. Buradan hareketle, düzeltilmiş gelecek projeksiyonu RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları iklim modeli verileri SWAT programında kurulmuş olan hidrolojik modele iklim verisi olarak girilerek hidrolojik model ilk 5 yılı ısınma süresi olmak üzere 2021-2100 periyodu için çalıştırılmış ve gelecek simülasyonu akım verileri elde edilmiştir.

EC-Earth2 iklim modeli gelecek simülasyonunda havza üzerindeki meteorolojik parametreler açısından sonuçlar incelendiğinde havzanın Sakarya bölgesi için; genel olarak sulak dönemde yağışların arttığı, kurak dönemde ise yağışlarda azalma meydana geldiği görülmektedir. RCP8.5 senaryosunda bu artış ve azalışların daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Yıllık toplam yağış miktarı olarak RCP4.5 senaryosunda yağış miktarında 70 mm civarında artış görülmüş, RCP8.5 senaryosunda ise yağış miktarı yaklaşık olarak aynı kalmıştır. Sakarya bölgesi maksimum ve minimum sıcaklıklarında yılın tümünde düzenli ve belirgin bir artış olmaktadır. RCP4.5 senaryosunda ortalama yıllık maksimum sıcaklıkta yaklaşık 2 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3 °C artış görülmektedir. Yıllık ortalama minimum sıcaklıkta ise RCP4.5 senaryosunda 1,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 2,5 °C artış görülmektedir. EC-Earth2 iklim modelinin gelecek simülasyonunda havza üzerindeki meteorolojik parametreler açısından havzanın Mudurnu bölgesi sonuçları incelendiğinde; Sakarya bölgesine benzer şekilde genel olarak sulak dönemde yağışların arttığı, kurak dönemde ise yağışlarda azalma meydana geldiği görülmektedir. RCP8.5 senaryosunda bu artış ve azalışların daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Yıllık toplam yağış miktarı olarak RCP4.5 senaryosunda yağış miktarında 40 mm civarında artış görülmüş, RCP8.5 senaryosunda ise yağış miktarının gelecek periyodunun ilk yarısında 50 mm artmakla birlikte gelecek periyodunun ikinci yarısında gözlem ortalamasına yakın olduğu görülmüştür. Mudurnu bölgesi maksimum ve minimum sıcaklıklarında Sakarya bölgesine benzer şekilde yılın tümünde düzenli ve belirgin bir artış olmaktadır. RCP4.5 senaryosunda ortalama yıllık maksimum sıcaklıkta yaklaşık 2,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 4 °C artış görülmektedir. Yıllık ortalama minimum sıcaklıkta ise RCP4.5 senaryosunda 2,5 °C, RCP8.5 senaryosunda ise yaklaşık 3,5 °C artış görülmektedir. Bu sonuçlara göre havzanın Mudurnu bölgesi, Sakarya bölgesine göre gelecek projeksiyonunda daha

fazla ısınacaktır. Yağış miktarı olarak ise havzanın Sakarya bölgesinde Mudurnu bölgesine göre daha fazla artış meydana gelecektir.

EC-Earth2 iklim modeli gelecek simülasyonunda havza üzerindeki hidrolojik parametreler açısından sonuçlar incelendiğinde; Mudurnu Çayı ana kolu üzerinde bulunan Dokurcun ve Gebeş AGİ akımlarının Aralık-Mart ayları arası sulak dönemde RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre sırasıyla Dokurcun AGİ’de %113 (10 m³/s) - %130 (11 m³/s), Gebeş AGİ’de %56 (12 m³/s) - %65 (15 m³/s) oranlarında ciddi şekilde arttığı görülmüştür. Akımlardaki bu artış durumu, Ocak ayında RCP4.5 ve RCP8.5 senaryosunda sırasıyla Dokurcun AGİ için %174 (13 m³/s) - %179 (13,5 m³/s), Gebeş AGİ için ise %82 (16,5 m³/s) - %87 (17,5 m³/s) oranlarına varan şekilde çok yüksek seviyelere çıkmaktadır. Su toplama havzası olarak sadece Sakarya bölgesinden beslenen Dinsiz Çayı üzerinde bulunan Yağbasan AGİ’de ise Ocak-Haziran ayları arasında her iki senaryoda da akımlar %31 (2 m³/s) oranında gözlem verilerine göre daha yüksek gerçekleşmektedir.

Gelecek projeksiyonu yağış miktarında ve neticesinde akım sonuçlarında gözlenen bu ciddi artış durumu havzadaki akarsularda taşkın açısından riskler oluşturabilir. Bölgede yer alan kentsel alanlarda da kentsel taşkınlar açısından potansiyel risk oluşmaktadır. Bu nedenle hem akarsu taşkınları hem de kentsel taşkınlar üzerindeki iklim değişikliği etkileri ve gelecek iklim projeksiyonu sonuçlarının görülmesi açısından iklim modelleri ve senaryolarına göre şiddet-süre-tekerrür (IDF) eğrilerinin oluşturulması ve anlık pik taşkın debilerinin hesaplanması çalışmaları gerçekleştirilebilir. Bu yönde yapılacak çalışmalar kentsel drenaj sistemleri ve akarsu taşkın koruma yapılarının gelecek projeksiyonunda yaşanması muhtemel iklimsel değişikliklere uyum göstermesi ve yaşanabilecek olası taşkın olayları ile olumsuz etkilerinin önüne geçebilir.

Diğer bir açıdan oluşturulan bu hidrolojik model, Sakarya ve Kocaeli illerinin önemli bir su kaynağı olacak olan Ballıkaya Barajı’nın işletme çalışmalarına, havzanın mevcut ve gelecek durumdaki yönetim stratejilerinin belirlenmesine ve iklim değişikliğinin etkilerini azaltmaya yönelik kararlar alınmasına yardımcı olabilecektir.

Ballıkaya Barajı’nda su tutulması sonrasında, belirli bir zaman sonra baraj gölünün havzadaki yağış, buharlaşma, sıcaklık vb. gibi iklim parametrelerine olan etkisi ve bunun neticesinde arazi örtüsünde yaşanabilecek değişimler ile yağış-akış ilişkisindeki

değişimin baraj gölü öncesi ve sonrası durumlarına göre incelenmesi ayrıca bir araştırma konusu olabilir.



KAYNAKLAR

- Abbaspour, K. C. (2015). *SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty programs user manual*. EAWAG.
- Abbaspour, K., Vaghefi, S., & Srinivasan, R. (2018). 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>
- Ali, A. M., ve Söffker, D. (2018). Towards Optimal Power Management of Hybrid Electric Vehicles in Real-Time: A Review on Methods, Challenges, and State-Of-The-Art Solutions. *Energies*, 11(3), 476. <https://doi.org/10.3390/en11030476>
- Arnold, J. G., Williams, J. R., & Maidment, D. R. (1995). Continuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(2), 171-183. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1995\)121:2\(171\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:2(171))
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Arnold, J. G., Gassman, P. W., & White, M. J. (2010, Şubat, 21-24). New developments in the SWAT ecohydrology model. *21st Century Watershed Technology: Improving Water Quality and Environment Conference Proceedings* içinde. San José, Costa Rica.
- Arnold J. G., Moriasi D. N., Gassman P. W., Abbaspour K. C., White M. J., Srinivasan R., Santhi C., van Harmel R. D., Van Griensven A., Van Liew M. W., Kannan N., & Jha M. K. (2012). SWAT: model use, calibration, and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4), 1491–1508. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>.
- Askar, M. A. A. (2020). *İklim Değişikliğinin Seyhan Havzasi Su Kaynakları Üzerindeki Etkilerinin Swat Modeli İle Değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Çukurova Üniversitesi.
- Brown, L. C., ve Barnwell, T. O. (1987). *The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS (EPA/600/3-87-007)*. US Environmental Protection Agency.
- Chen, J., Brissette, F. P., & Leconte, R. (2011a). Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology*, 401(3-4), 190-202. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.020>.

- Chen, J., Brissette, F. P., Poulin, A., & Leconte, R. (2011b). Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed. *Water Resources Research*, 47(12), W12509. <https://doi.org/10.1029/2011WR010602>
- Chen, Y., Xu, C. Y., Chen, X., Xu, Y., Yin, Y., Gao, L., & Liu, M. (2019). Uncertainty in simulation of land-use change impacts on catchment runoff with multi-timescales based on the comparison of the HSPF and SWAT models. *Journal of Hydrology*, 573, 486-500. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.091>
- Copernicus (2023, 2 Mayıs). CORDEX regional climate model data on single levels. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cordex-domains-single-levels?tab=overview>
- Copernicus (2023, 2 Mayıs). What is bias correction? <https://climate.copernicus.eu/sites/default/files/2021-01/infosheet7.pdf>
- Coupled Model Intercomparison Project (2023, 2 Mayıs). Overview. <https://wcrp-cmip.org/cmip-overview/>
- Cramér, H. (1999). *Mathematical Methods of Statistics* (9th ed.). Princeton University Press.
- Cüceloğlu, G. (2019). *İklim Değişikliğinin İstanbul'un Yüzeysel Su Kaynaklarına Etkisi Ve Kuraklık Dirençli Bütünleşik Su Yönetimi* [Doktora Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Dilibaier, A. (2022). *Modelling Climate Change Impacts At Altınapa Reservoir Watershed* [Doktora Tezi]. Erciyes Üniversitesi.
- Dingman, S. L. (1994). *Physical hydrology*. Prentice-Hall, Inc.
- DSİ. (2010). *Adapazarı İçmesuyu Projesi Planlama Raporu*. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü.
- EC-Earth - A European community Earth System Model (2023, 2 Mayıs). Home. <https://ec-earth.org/>
- Esterling, D. R., Meehl, G.A., Parmesan, C., Changnon, S. A., Karl, T. R. & Mearns, L. O. (2000). Climate Extremes: Observations, Modeling, and Impacts. *Science*, 289(5487), 2068-2074. <https://doi.org/10.1126/science.289.5487.2068>
- Ford, T. W., Quiring, S. M., Thakur, B., Jogineedi, R., Houston, A., Yuan, S., Kalra, A., & Lock, N. (2018). Evaluating Soil Moisture–Precipitation Interactions Using Remote Sensing: A Sensitivity Analysis. *Journal of Hydrometeorology*, 19(8), 1237-1253. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-17-0243.1>
- Forte, F., Strobl, R. O., & Pennetta, L. (2006). A methodology using GIS, aerial photos and remote sensing for loss estimation and flood vulnerability analysis in the Supersano-Ruffano-Nociglia Graben, southern Italy. *Environmental Geology*, 50, 581-594. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0234-0>
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.23637>

- Green, W. H., ve Ampt, G. A. (1911). Studies on soil physics: 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences*, 4(1), 11-24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Griffin, M. T., Montz, B. E., & Arrigo, J. S. (2013). Evaluating climate change induced water stress: A case study of the Lower Cape Fear basin, NC. *Applied Geography*, 40, 115-128. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.02.009>
- Gupta, H.V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135-143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))
- Güngör, Ö. (2018). *SWAT Modeli Kullanılarak Filyos Çayı Havzasi'nin Hidrolojik Analizi* [Doktora Tezi]. Bülent Ecevit Üniversitesi.
- Hargreaves, G. L., Hargreaves, G. H., & Riley, J. P. (1985). Agricultural benefits for Senegal River Basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 111(2), 113-124. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1985\)111:2\(113\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1985)111:2(113))
- Hazeleger, W., Severijns, C., Semmler, T., Ștefanescu, S., Yang, S., Wang, X., Wyser, K., Dutra, E., Baldasano, J. M., Bintanja, R., Bougeault, P., Caballero, R., Ekman, A. M. L., Christensen, J. H., van den Hurk, B., Jimenez, P., Jones, C., Kaällberg, P., Koenigk, T., ... Willen, U. (2010). EC-Earth: a seamless earth-system prediction approach in action. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 1357–1363. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS2877.1>
- Hazeleger, W., Wang, X., Severijns, C., Ștefanescu, S., Bintanja, R., Sterl, A., Wyser, K., Semmler, T., Yang, S., van den Hurk, B., van Noije, T., van der Linden, E., ve van der Wiel, K. (2012). EC-Earth V2.2: description and validation of a new seamless earth system prediction model. *Climate Dynamics*, 39, 2611–2629. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1228-5>
- Hershfield, D.M. (1961). *Rainfall frequency atlas of the United States for durations from 30 minutes to 24 hours and return periods from 1 to 100 years*. U.S. Dept. Commerce Tech. Paper No. 40.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2023, 2 Mayıs). Overview. <https://www.ipcc.ch/about/>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jisha, J., Ghosh, S., Pathak, A., & Sahai, A. K. (2018). Hydrologic impacts of climate change: Comparisons between hydrological parameter uncertainty and climate model uncertainty. *Journal of Hydrology*, 566, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.080>
- Joshi, N., ve Dongol, R. (2018). Severity of Climate Induced Drought and its Impact on Migration: A Study of Ramechhap District, Nepal. *Tropical Agricultural Research*, 29(2), 194-211. <https://doi.org/10.4038/tar.v29i2.8289>

- Joshi, N., Tamaddun, K., Parajuli, R., Kalra, A., Maheshwari, P., Mastino, L., & Velotta, M. (2020). Future Changes in Water Supply and Demand for Las Vegas Valley: A System Dynamic Approach based on CMIP3 and CMIP5 Climate Projections. *Hydrology*, 7(1), 16. <https://doi.org/10.3390/hydrology7010016>
- Joshi, N., Kalra, A., Thakur, B., Lamb, K. W., & Bhandari, S. (2021). Analyzing the Effects of Short-Term Persistence and Shift in Sea Level Records along the US Coast. *Hydrology*, 8(1), 17. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010017>
- Jouma, N. (2019). *Sultan Sazlığı'nda İklim Değişikliği Ve Arazi Kullanımı/Örtüsü Değişimlerinin Etkilerinin SWAT İle Modellenmesi* [Doktora Tezi]. Erciyes Üniversitesi.
- Kalra, A., Li, L., Li, X., & Ahmad, S. (2013). Improving Streamflow Forecast Lead Time Using Oceanic-Atmospheric Oscillations for Kaidu River Basin, Xinjiang, China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(8), 1031-1040. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000707](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000707)
- Kemanian, A. R., Julich, S., Manoranjan, V. S., & Arnold, J. G. (2011). Integrating soil carbon cycling with that of nitrogen and phosphorus in the watershed model SWAT: Theory and model testing. *Ecological Modelling*, 222(12), 1913-1921. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.03.017>
- Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K., & Maidment, D. R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, 75(4), 325-336. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.024>
- Knisel, W. G. (1980). *CREAMS, a field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems*. USDA.
- Leander, R., ve Buishand, T. A. (2007). Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology*, 332(3-4), 487-496. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.08.006>.
- Leander, R., Buishand, T. A., van den Hurk, B. J. J. M., & de Wit, M. J. M. (2008). Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. *Journal of Hydrology*, 351(3-4), 331-343. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.020>.
- Lenderink, G., Buishand, A., & van Deursen, W. (2007). Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology & Earth System Sciences*, 11(3), 1145-1159. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.30578>
- Leonard, R. A., Knisel, W. G., & Still, D. A. (1987). GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Transactions of the ASAE*, 30(5), 1403-1418. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.30578>
- Middelkoop, H., Daamen, K., Gellens, D., Grabs, W., Kwadijk, J. C. J., Lang, H., Parmet, B. W. A. H., Schadler, B., Schulla, & Wilke, H. (2001). Impact of Climate Change on Hydrological Regimes and Water Resources Management in the Rhine Basin. *Climatic Change*, 49, 105-128. <https://doi.org/10.1023/A:1010784727448>

- Merz, B., Aerts, J., Arnbjerg-Nielsen, K., Baldi, M., Becker, A., Bichet, A., Blöschl, G., Bouwer, L. M., Brauer, A., Cioffi, F., Delgado, J. M., Gocht, M., Guzzetti, F., Harrigan, S., Hirschboeck, K., Kilsby, C., Kron, W., Kwon, H. H., Lall, ... Nied, M. (2014). Floods and climate: emerging perspectives for flood risk assessment and management. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(7), 1921-1942. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1921-2014>
- Mesta Yoleri, B. (2022). *Impact of climate change in the Southern Mediterranean of Turkey: A method to assess Oymapınar reservoir's inflow projections* [Doktora Tezi]. Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and the environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19, 205-234.
- 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., Daggupati, P., & Pai, N. (2015). Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 58(6), 1763-1785. <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>
- Müller, C., Franke, J., Jagermeyr, J., Ruane, A. C., Elliot, J., Moyer, E., Heinke, J., Falloon, P. D., Folberth, C., Francois, L., Hank, T., Izaurrealde, R. C., Jacquemin, I., Liu, W., Olin, S., Pugh, T. A. M., Williams, K., & Zabel, F. (2021). Exploring uncertainties in global crop yield projections in a large ensemble of crop models and CMIP5 and CMIP6 climate scenarios. *Environmental Research Letters*, 16(3), 034040. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd8fc>
- Nash, J. E., ve Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation* (Version 2009). USDA-ARS Grassland Soil and Water Research Laboratory, and Texas A&M University, Blackland Research and Extension Center.
- Ngigi, S. N. (2009). *Climate Change Adaptation Strategies: Water Resources Management Options For Smallholder Farming Systems In Sub-Saharan Africa*. The Earth Institute at Columbia University.
- Özdemir, A. (2021). İklim Değişikliğinin Havza Ölçeğinde Akım ve Sediman Miktarına Etkilerinin Değerlendirilmesi: Yuvacık Baraj Gölü Havzası. *Jeoloji Mühendisliği Dergisi*, 45, 129-153. <https://doi.org/10.24232/jmd.941528>
- Peker, İ. B. (2020). *Türkiye'deki Dağlık Havzalarda Uygulanan Swat Modeli İle İklim Değişikliğinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Eskişehir Teknik Üniversitesi.
- Pradhan, B. (2009). Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. *Journal of Spatial Hydrology*, 9(2), 1-18.

- Priestley, C. H. B., ve Taylor, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100%3C0081:OTAOSH%3E2.3.CO;2)
- Priyanko D., Zhang Z., ve Ren, H. (2022). Evaluation of four bias correction methods and random forest model for climate change projection in the Mara River Basin, East Africa. *Journal of Water and Climate Change*, 13(4), 1900-1919. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.299>
- Rallison, R. E., ve Miller, N. (1981, 18-21, Mayıs). Past, Present, and Future SCS runoff procedure. V.P. Singh (Ed.), *Rainfall-Runoff Relationship Proceedings of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling* içinde. Mississippi, U.S.A.
- Saddiqi, M. M. (2019). *Modelling Kucuk Menderes Watershed Using Soil And Water Assessment Tool (SWAT)* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Sennikovs, J., ve Bethers, U. (2009, 13-17, Temmuz). Statistical downscaling method of regional climate model results for hydrological modelling. R.S. Anderssen, R.D. Braddock, L.T.H. Newham, (Ed.), *18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation* içinde. Cairns, Australia.
- Schmidli, J., Frei, C., & Vidale, P. L. (2006). Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*, 26(5), 679 – 689. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.1287>.
- Singh, J., Knapp, H. V., & Demissie, M. (2005). Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 41(2), 343 – 360. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03740.x>
- SYGM. (2016). *İklim Değişikliğinin Su Kaynaklarına Etkisi Projesi: Proje Nihai Raporu*. Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.
- Teutschbein, C., ve Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456-457, 12-29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Teutschbein, C., ve Seibert, J. (2013). Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions? *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(12), 5061-5077. <https://doi.org/10.5194/hess-17-5061-2013>
- Thom, H. C. S. (1952). Seasonal degree-day statistics for the United States. *Monthly Weather Review*, 80(9), 143-147. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1952\)080%3C0143:SDSFTU%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1952)080%3C0143:SDSFTU%3E2.0.CO;2)
- Thom, H. C. S. (1954). The rational relationship between heating degree days and temperature. *Monthly Weather Review*, 82(1), 1-6. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1954\)082%3C0001:TRRBHD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1954)082%3C0001:TRRBHD%3E2.0.CO;2)

- Thom, H. C. S. (1958). A note on the gamma distribution. *Monthly Weather Review*, 86(4), 117-122. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1958\)086%3C0117:ANOTGD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1958)086%3C0117:ANOTGD%3E2.0.CO;2)
- The Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment - Europe (2023, 2 May). About. <https://euro-cordex.net/060374/index.php.en>
- The Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (2023, 2 May). Region 4: Europe (EURO). <https://cordex.org/domains/cordex-region-euro-cordex/>
- U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. (1972). *Section 4: Hydrology In National Engineering Handbook*. SCS.
- Williams, J. R., Jones, C. A., & Dyke, P. T. (1984). A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 27(1), 129-144. <https://doi.org/10.13031/2013.32748>
- Williams, J. R., Nicks, A. D., & Arnold, J. G. (1985). Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(6), 970-986. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1985\)111:6\(970\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:6(970))
- Worku, G., Teferi, E., Bantider, A., & Dile, Y. T. (2020). Statistical bias correction of regional climate model simulations for climate change projection in the Jemma sub-basin, upper Blue Nile Basin of Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*, 139, 1569-1588. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-03053-x>
- You, Q., Cai, Z., Wu, F., Jiang, Z., Pepin, N., & Shen, S. S. P. (2021). Temperature dataset of CMIP6 models over China: evaluation, trend and uncertainty. *Climate Dynamics*, 57, 17-35. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05691-2>
- Zhang, B., Shrestha, N. K., Daggupati, P., Rudra, R., Shukla, R., Kaur, B., & Hou, J. (2018). Quantifying the Impacts of Climate Change on Streamflow Dynamics of Two Major Rivers of the Northern Lake Erie Basin in Canada. *Sustainability*, 10(8), 2897. <https://doi.org/10.3390/su10082897>



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Abdulkadir BAYCAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM:

- 2012-2014 yılları arasında karayolu inşaatı yapan firmalarda saha mühendisi ve şantiye şefi olarak çalıştı.
- 2015 yılından itibaren Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi'nde kentsel altyapı ve su yapıları alanlarında proje mühendisi olarak çalışmaktadır.