

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SENARYOLARINDA PORSUK HAVZASI'NDAKİ
OLASI KURAKLIKLARIN BELİRLENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ**

Selma Nur TÜRKER

TARIMSAL YAPILAR VE SULAMA ANABİLİM DALI

**ANKARA
2025**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SENARYOLARINDA PORSUK HAVZASI'NDAKİ OLASI KURAKLIKLARIN BELİRLE MESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Selma Nur TÜRKER

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Tarımsal Yapılar ve Sulama Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Alper Serdar ANLI

İklim değişikliğinin su döngüsü üzerindeki etkileri, kuraklık olaylarının sıklığını ve şiddetini artırarak özellikle tarım ve su kaynakları yönetimi için önemli riskler doğurmaktadır. Bu çalışma, Porsuk Havzası'nda 2024–2100 dönemine yönelik meteorolojik (SPI) ve hidrolojik (SRI) kuraklık koşullarını değerlendirmek amacıyla hazırlanmıştır. Farklı zaman ölçeklerinde yürütülen analizlerde iki ayrı iklim senaryosu (RCP4.5 ve RCP8.5) kullanılmış; hidrolojik modelleme ise HEC-HMS aracılığıyla, 1980–2012 dönemine ait kalibrasyon ve doğrulama süreçleri tamamlanarak gerçekleştirilmiştir. Projeksiyon sonuçları, havzanın yıllık akım potansiyelinde RCP4.5 altında yaklaşık %17, RCP8.5 altında ise %23 düzeyinde azalma öngörmektedir. Meteorolojik kuraklık analizleri özellikle RCP8.5 senaryosunda 2060 sonrası için çok şiddetli kuraklıkların belirgin biçimde arttığını göstermektedir. Hidrolojik kuraklık, RCP4.5 senaryosunda daha sınırlı olmakla birlikte 2075–2099 döneminde şiddetli düzeylere ulaşmaktadır. Dönemsel incelemeler, 2024–2050 arasında orta şiddette kuraklıkların ağırlıkta olduğunu; yüzyılın son çeyreğinde ise şiddetli ve çok şiddetli kuraklıkların bölgesel ölçekte yaygınlaştığını ortaya koymaktadır. Haziran–Eylül döneminde 6 ve 9 aylık SPI/SRI analizlerinin en yüksek riskleri göstermesi, tarımsal faaliyetlerin kırılganlığını artırmaktadır. Mekânsal dağılım sonuçları, Eskişehir (Tepebaşı, Odunpazarı) ve Kütahya'nın bazı ilçelerinde yüksek kuraklık riski bulunduğunu; Porsuk HES ve Kütahya Sulaması gibi altyapıların da etkilenebileceğini göstermektedir. Yağışa bağımlı ürünlerin meteorolojik, sulama ihtiyacı yüksek ürünlerin ise hidrolojik kuraklığa duyarlılığı, üretim planlamasında riskleri artırmaktadır. Genel olarak bulgular, özellikle RCP8.5 senaryosunda 2060 sonrası dönemin havza için kritik bir eşige işaret ettiğini, kuraklık sıklığı ve şiddetindeki artışın entegre su yönetimi, sulama planlaması ve uyum stratejilerinin birlikte ele alınmasını zorunlu kıldığını göstermektedir.

Ekim 2025, 142 sayfa

Anahtar Kelimeler: İklim değişikliği, iklim değişikliği senaryoları, kuraklık, kuraklık yönetimi, sulama

ABSTRACT

PhD Thesis

EVALUATION AND DETERMINATION OF POSSIBLE DROUGHTS IN THE PORSUK BASIN IN CLIMATE CHANGE SCENARIOS

Selma Nur TÜRKER

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Agricultural Structures and Irrigation

Supervisor: Prof. Dr. Alper Serdar ANLI

Climate change is disrupting the hydrological cycle, leading to more frequent and intense drought events and creating substantial risks for both agricultural production and water resources management. This study examines meteorological (SPI) and hydrological (SRI) drought conditions in the Porsuk Basin for the 2024–2100 period. Analyses were carried out at multiple time scales using two climate scenarios, RCP4.5 and RCP8.5, while hydrological simulations were performed with the HEC-HMS model following calibration and validation based on data from 1980 to 2012. The projections indicate that the basin's annual streamflow may decline by about 17 percent under RCP4.5 and by roughly 23 percent under RCP8.5. Meteorological droughts are expected to intensify, particularly under RCP8.5, with very severe conditions becoming prominent after 2060. Hydrological droughts remain more moderate under RCP4.5 but reach severe levels toward the 2075–2099 period. Overall, the early part of the century is characterized mainly by moderate drought, while the final decades show a clear shift toward severe and very severe conditions across the basin. The June–September season, which corresponds to the most critical phase of agricultural activity, reveals the highest drought risk in the 6- and 9-month SPI/SRI analyses. Spatial results highlight high-risk areas in parts of Eskişehir (Tepebaşı, Odunpazarı) and Kütahya, and suggest that key water infrastructures such as Porsuk HPP and Kütahya Irrigation may also be affected. Rainfed crops are particularly vulnerable to meteorological drought, while crops with high irrigation demand are more exposed to hydrological drought, increasing the fragility of agricultural production. Taken together, the findings indicate that the period after 2060 represents a critical threshold for the basin, especially under the RCP8.5 scenario. The projected increase in drought frequency and severity underscores the need for integrated approaches to water management, irrigation planning, and climate adaptation.

October 2025, 142 page

Key Words: Climate change, climate change scenarios, drought, drought management, irrigation

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması, küresel iklim değişikliğinin bölgesel ölçekteki etkilerinin ortaya konulması açısından önemli bir örnek teşkil eden Porsuk Havzası'nda, 2024–2100 dönemine yönelik kuraklık risklerinin değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Gerek meteorolojik gerekse hidrolojik kuraklık göstergeleriyle yapılan detaylı analizler, iklim değişikliği senaryoları altında havzanın karşı karşıya kalabileceği olası tehditleri ve bu tehditlerin tarımsal üretim ile su kaynakları yönetimi üzerindeki etkilerini kapsamlı biçimde ortaya koymaktadır.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında bilimsel katkıları, yönlendirmeleriyle her aşamada destek olan tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Alper Serdar Anlı'ya teşekkür ederim. Akademik yaklaşımı, tezin niteliğinin gelişmesine önemli ölçüde katkı sağlamıştır.

Tez sürecinde katkılarını esirgemeyen, öneri ve eleştirileriyle çalışmamı daha güçlü hale getiren Sayın Prof. Dr. Belgin ÇAKMAK'a ve Sayın Prof. Dr. Yusuf Ersoy YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Modelleme ve analiz süreçlerinde teknik bilgi ve yönlendirmeleriyle katkı sunan Sayın Dr. Eser BORA'ya teşekkür ederim. Çalışmanın nicel temellerinin sağlamlaşmasında sunduğu destek büyük önem taşımaktadır.

Bilgi ve belge temini noktasında yardımlarını esirgemeyen DSİ Genel Müdür Yardımcısı Sayın Faruk FIRATOĞLU'na, verilerin sağlanması ve meteorolojik analizlerin gerçekleştirilmesinde destek olan MGM Genel Müdürü Sayın Volkan COŞKUN'a ve SYGM bünyesinde görev yapan değerli çalışanlara içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, bu uzun ve zorlu sürecin her anında yanımda olan, bilgi birikimiyle yolumu aydınlatan ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili babam, TAGEM Önceki Genel Müdürü ve TRGM Genel Müdür Yardımcısı Sayın Dr. Metin TÜRKER'e en derin şükranlarımı sunarım. Gerek teknik konularda sunduğu öneriler gerekse moral desteği sayesinde bu süreci kararlılıkla sürdürme gücü buldum.

Son olarak, bu çalışmanın hazırlanmasında verilerin temini, yazılım süreçleri ve analizlerin yürütülmesi aşamalarında katkı sunan tüm kurumlara ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Bu tezin, Porsuk Havzası ve benzeri su havzaları için sürdürülebilir su yönetimi, tarımsal planlama ve iklim değişikliğine uyum stratejileri geliştirilmesinde yol gösterici olmasını temenni ederim.

Selma Nur TÜRKER
Ankara, Ekim 2025

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAYI SAYFASI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE KURAMSAL TEMELLER.....	12
2.1 Küresel ve Bölgesel İklim Değişikliği Çalışmaları	12
2.2 İklim Değişikliğinin Su Kaynakları ve Hidrolojik Süreçlere Etkisi.....	15
2.3 Kuraklık Analizleri ve İndeks Uygulamaları	21
2.3.1 Kuraklık ve Türkiye’de kuraklık yönetimi	28
2.4 İklim Değişikliğinin Tarımsal Üretim ve Gıda Güvenliğine Etkisi	32
2.5 Uyum, Politika ve Sosyo-Ekonomik Yaklaşımlar	42
2.6 HEC-HMS, GIS ve Hidrolojik Modelleme Çalışmaları	45
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	55
3.1 Materyal	55
3.1.1 Araştırma alanı	55
3.1.2 İklim özellikleri	56
3.1.3 Arazi varlığı, toprak ve topoğrafya özellikleri	57
3.1.4 Su kaynakları ve sulamaya açılan alanları	59
3.1.5 Çalışmada kullanılan veriler	62
3.1.5.1 Meteorolojik veriler	62
3.1.5.2 Hidrolojik veriler	62
3.1.5.3 İklim projeksiyon verileri.....	63
3.1.5.4 Kuraklık indekslerinde kullanılan veriler	63
3.1.5.5 İklim değişikliği (HEC-HMS) hidrolojik modelinde kullanılan veriler	64
3.2 Yöntem	65
3.2.1 Hidrolojik modelleme yaklaşımı.....	65
3.2.2 Modelin kalibrasyonu ve validasyonu (doğrulaması).....	67

3.2.3 İklim senaryoları altında akım projeksiyonlarının elde edilmesi.....	70
3.2.4 Kuraklık indekslerinin hesaplanması (SRI, SPI).....	71
3.2.5 İklim değişikliği senaryoları ve kuraklık projeksiyonları.....	73
3.2.6 CBS Tabanlı mekânsal analizler ve kuraklık maruziyetinin haritalanması ..	74
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	76
4.1 Porsuk Havzası İklim Projeksiyon Verileri.....	76
4.2 Porsuk Havzası Hidrolojik Model Kalibrasyon ve Validasyon Çalışması	77
4.2.1 Porsuk havzası kalibrasyon çalışması	80
4.2.2 Porsuk havzası doğrulama (validasyon) çalışması.....	85
4.2.3 Porsuk havzasının iklim değişikliği altındaki akım projeksiyon verilerinin hazırlanması	89
4.3 Porsuk Havzası Kuraklık Analizleri	91
4.3.1 Porsuk havzası standart yüzeyakış indeks (SRI) sonuçları (RCP 8.5).....	92
4.3.2 Porsuk havzası standart yağış indeks (SPI) sonuçları (RCP 8.5)	97
4.3.3 Porsuk havzası standart akış indeks (SRI) sonuçları (RCP 4.5)	102
4.3.4 Porsuk havzası standart yağış indeks (SPI) sonuçları (RCP4.5)	107
4.4 Porsuk Havzası Kuraklık Maruziyeti Haritaları	113
4.4.1 Meteorolojik kuraklık maruziyeti haritaları.....	114
4.4.2 Hidrolojik kuraklık maruziyeti haritaları	118
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE ÖNERİLER	124
5.1 Araştırma Sonuçları	124
5.2 Öneriler	126
KAYNAKLAR	131
ÖZGEÇMİŞ.....	142

SİMGELER DİZİNİ

°C	Santigrad derece
%	Yüzde
da	Dekar
ha	Hektar
km	Kilometre
m	Metre
m ²	Metrekare
m ³	Metreküp
mm	Milimetre
s	Saniye
R ²	Korelasyon katsayısı
x _i	belirli dönem akım değeri
x _j	Uzun dönemli ortalama akım değeri (klimatolojik referans ortalaması).
σ (sigma)	Uzun dönemli akım değerlerinin standart sapması
n	Gözlem sayısı (toplam veri sayısı)
i	Gözlem sırası (indeks)
y _i	Gerçek (gözlenen) değer
y _i '	Tahmin edilen değer
y _i -y _i '	Hata (sapma) değeri

Kısaltmalar

AB	Avrupa Birliği
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AFAD	Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı
BMÇMS	Birleşmiş Milletler Çölleşme ile Mücadele Sözleşmesi
BM	Birleşmiş Milletler
CBS	Coğrafi Bilgi Sistemleri
ÇŞİDB	Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı
DEM	Sayısal Yükseklik Modeli
DSİ	Devlet Su İşleri
FAO	Dünya Gıda ve Tarım Örgütü
GIDMaPS	Küresel Entegre Kuraklık İzleme ve Tahmin Sistemi
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System
IPCC	Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli
KHGM	Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü
MGM	Meteoroloji Genel Müdürlüğü
PNI	Normal Yağış Yüzdesi

RCP	Representative Concentration Pathways
RMSE	Validasyon Standart Sapma
SSP	Shared Socioeconomic Pathways)
SPI	Standart Yağış İndeksi
SRI	Standart Akım İndeksi
TARSİM	Tarım Sigortaları Havuzu
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
UNDP	Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı
UNFCCC	Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi
TAGEM	Tarımsal Araştırmalar Genel Müdürlüğü
TOB	Tarım ve Orman Bakanlığı
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Tarımsal kuraklıkla yönetimi şeması	29
Şekil 2.2 Türkiye kuraklık değerlendirmesi 1980-2020	32
Şekil 3.1 Araştırma Alanı, Porsuk Havzası coğrafi konum haritası	56
Şekil 3.2 Porsuk Alt Havzası kurumlara göre arazi varlığı dağılımı	58
Şekil 3.3 Porsuk Havzası HEC-GeoHMS ve HEC-HMS modelleme iş akışı	66
Şekil 4.1 Porsuk Havzası iklim projeksiyon grid noktaları.....	76
Şekil 4.2 Porsuk Havzası akım gözlem istasyonları (AGİ)	78
Şekil 4.3 Porsuk Havzası ve D12A134 istasyonu yağış alanı.....	78
Şekil 4.4 Porsuk Havzası Thiessen poligonu	79
Şekil 4.5 Porsuk Havzası HEC-HMS model arayüzü.....	80
Şekil 4.6 Kalibrasyon dönemi gözlenen ve simüle edilen akım zaman serileri.....	81
Şekil 4.7 Porsuk Havzası HEC-HMS kalibre edilmiş model ve gerçek akım değerleri (1980-2000)	82
Şekil 4.8 Kalibrasyon korelasyon grafiği (Model–Gözlem)	84
Şekil 4.9 Kalibrasyon analizine ait HEC-HMS özet sonuçları	85
Şekil 4.10 Validasyon dönemi gözlenen ve simüle edilen akım zaman serileri	86
Şekil 4.11 Porsuk Havzası HEC-HMS kalibre edilmiş model ve gerçek akım değerleri (1980-2000)	86
Şekil 4.12 Porsuk Havzası HEC-HMS modeli validasyon eğrisi (2000-2012)	87
Şekil 4.13 Validasyon analizine ait HEC-HMS özet sonuçları.....	88
Şekil 4.14 Porsuk Havzasının RCP 8.5 senaryosuna ait aylık ortalama akım projeksiyon değerleri	89
Şekil 4.15 Porsuk Havzasının RCP 4.5 senaryosuna ait aylık ortalama akım projeksiyon değerleri	90
Şekil 4.16 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SRI sonuçları.....	92
Şekil 4.17 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SRI3 sonuçları.....	93
Şekil 4.18 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SRI6 sonuçları.....	94
Şekil 4.19 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SRI9 sonuçları.....	95
Şekil 4.20 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SRI12 sonuçları.....	96
Şekil 4.21 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SPI1 sonuçları	97
Şekil 4.22 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SPI3 sonuçları	98
Şekil 4.23 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SPI6 sonuçları	99

Şekil 4.24 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SPI9 sonuçları	100
Şekil 4.25 2025-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SPI12 sonuçları	101
Şekil 4.26 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SRI1 sonuçları.....	102
Şekil 4.27 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SRI3 sonuçları.....	103
Şekil 4.28 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SRI6 sonuçları.....	104
Şekil 4.29 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SRI9 sonuçları.....	105
Şekil 4.30 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SRI12 sonuçları.....	106
Şekil 4.31 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SPI1 sonuçları	107
Şekil 4.32 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SPI3 sonuçları	108
Şekil 4.33 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SPI6 sonuçları	109
Şekil 4.34 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SPI9 sonuçları	110
Şekil 4.35 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SPI12 sonuçları	111
Şekil 4.36 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki SPI3 kuraklık maruziyeti haritası	114
Şekil 4.37 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki SPI6 kuraklık maruziyeti haritası	115
Şekil 4.38 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SPI6 kuraklık maruziyeti ve yağışa bağlı yetiştirilen ürün haritası	116
Şekil 4.39 Porsuk Havzasının Tepebaşı ve Odunpazarı İlçelerini kapsayan bölgede 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SPI6 kuraklık maruziyeti ve yağışa bağlı yetiştirilen ürün haritası.....	117
Şekil 4.40 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SPI9 kuraklık maruziyeti haritası	118
Şekil 4.41 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SRI3 kuraklık maruziyeti ve yağışa bağlı yetiştirilen ürün haritası	119
Şekil 4.42 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SRI6 kuraklık maruziyeti haritası	120
Şekil 4.43 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SRI6 kuraklık maruziyeti ve yağışa bağlı yetiştirilen ürün haritası	121
Şekil 4.44 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SRI9 kuraklık maruziyeti haritası	122
Şekil 4.45 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SRI9 kuraklık maruziyeti ve havza içerisindeki sulama yapıları	123

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Arazi kullanım dağılımı (Porsuk Alt Havzası)	57
Çizelge 3.2 Porsuk Havzası toprak kullanım sınıfları dağılımı	59
Çizelge 3.3 Porsuk Havzasındaki sulama alanlarının durumu.....	60
Çizelge 3.4 Porsuk Havzasındaki sulama tesisleri ve alanlar	61
Çizelge 3.5 Sulama alanlarının sulama sistemlerine göre dağılımı	61
Çizelge 3.6 SRI Kuraklık/Nemlilik Sınıfı.....	72
Çizelge 4.1 Porsuk Havzası HEC-HMS modeli kalibrasyon parametreleri	83
Çizelge 4.2 2024-2100 yılları arasındaki RCP4.5 -RCP8.5 senaryolarının 6-9 Aylık SPI ve SRI kuraklık risk değerleri (%).....	112

1. GİRİŞ

Küresel ısınma ve iklim değışikliği günümüz dünyasının geleceğini belirleyecek ve şekillendirecek en önemli konuların başında gelmektedir. Nüfus artışıyla paralel olarak gıda ihtiyacının büyümesi, sanayileşme ve kentleşme dinamikleriyle etkileşerek doğal kaynaklar, özellikle toprak ve su üzerinde ciddi bir kullanım baskısına neden olmaktadır. Kalkınma ve refahı artırma amaçlı çalışmalar, atmosfere salınan sera gazlarının doğal sera etkisini yükseltmekte ve yerkürenin ortalama yüzey sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Bu gelişmeler iklim, ekosistem ve ekonomi üzerinde ciddi değışimlere neden olmaktadır.

Birleşmiş Milletler Çölleşme ile Mücadele Sözleşmesi (BMÇMS) kuraklığı; yağış miktarının uzun yıllar ortalamasının belirgin şekilde altına düşmesi sonucu ortaya çıkan ve arazi ile üretim sistemlerini çevresel, tarımsal, ekonomik ve sosyal açılarından olumsuz etkileyen doğal bir olgu olarak tanımlamaktadır.

Bugün dünya nüfusu 8 milyar olup 2050 yılında bu nüfusun 9.7 milyar olması beklenmektedir (United Nations 2022). Bu nüfusun beslenebilmesi için de gıda üretiminin en az % 60 oranında artırılması gerekmektedir. Dünya Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) verilerine göre yerküre üzerinde 39 ülkede gıda, 80 ülkede ise su sıkıntısı yaşanmaktadır. Birçok iklim uzmanına göre iklim değışikliği ile kuraklığın dünyanın birçok bölgesinde verimli tarım arazilerinin azalmasına, toprak ve su kaynaklarının kirlenmesine ve verim kayıplarına neden olacağı ve bunun da gıda krizlerine yol açacağı ifade edilmektedir.

Küresel ısınma ve iklim değışikliği, dünya genelinde 1800'lü yıllardan bu yana tutulan sıcaklık kayıtları aracılığıyla değerlendirilmektedir. Bu verilere göre sıcaklıklar 1800'lü yıllardan günümüze kadar yaklaşık 1 °C artmıştır. Önümüzdeki yüzyıl boyunca sıcaklık artışlarının süreceği ve daha da belirgin hale geleceği tahmin edilmektedir. Yine en fazla sıcaklık artışları 2000'li yıllarda olmuştur. Sıcaklık artışlarına paralel olarak mevsimsel döngülerde kaymalar, yağış düzenlerinde bozulmalar yaşanmakta; kuraklık, sel, don, dolu

ve kasırğa gibi doğal afetlerin sıklığında artış gözlemlenmektedir. Bu durumun gelecek yüzyılda da benzer şekilde devam edeceği öngörülmektedir (IPCC 2014).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından 2023 yılında yayımlanan Altıncı Değerlendirme Raporu, iklim değişikliğinin hem hız kazandığını hem de etkilerinin giderek daha belirgin hale geldiğini ortaya koymaktadır. 2011–2020 dönemi itibarıyla küresel sıcaklık, sanayi öncesi döneme kıyasla yaklaşık 1.1 °C artmış olup 1.5 °C eşiğinin 2030–2040 yılları arasında aşılması beklenmektedir. Son 50 yıl, geçen 2000 yılın en hızlı ısınan dönemi olmuş ve bu artış büyük ölçüde insan faaliyetlerinden kaynaklanan sera gazı emisyonlarına bağlanmıştır. İklim değişikliği nedeniyle mevsim kaymaları, aşırı hava olayları ve doğal afetlerde artış gözlemlenmiş; özellikle kuraklık, sel, don, dolu, hortum ve kasırğa gibi olayların sıklığı ve şiddeti artmıştır (IPCC 2023).

İklim değişikliğinin etkilerinin gelecekte nasıl şekilleneceğini öngörebilmek için bilim insanları, sera gazı emisyonlarının farklı düzeylerde seyrettiği çeşitli iklim senaryoları geliştirmiştir. Bu senaryolar arasında yer alan RCP (Representative Concentration Pathways) ve SSP (Shared Socioeconomic Pathways) gibi modeller, iklim değişikliğinin potansiyel sonuçlarını anlamada önemli rol oynamaktadır (Van Vuuren vd. 2011, O'Neill vd. 2014).

Örneğin, yüksek emisyon (kötümser) senaryosu olan RCP8.5, sera gazlarının kontrol altına alınmadığı bir geleceği temsil ederken; RCP4.5 gibi daha ılımlı (iyimser) senaryolar, küresel emisyonların azaltılması yönünde alınan önlemleri kabul etmektedir. Bu kapsamda, iklim senaryoları, iklim değişikliğinin farklı düzeylerdeki etkilerini değerlendirmeye ve uyum politikaları geliştirmeye imkân veren temel araçlardır (IPCC 2021).

Sera gazı emisyonlarına yönelik etkili ve hızlı müdahalelerin gerçekleştirilmemesi halinde, mevcut iklim öngörülleri, küresel sıcaklıkların 2100 yılına kadar 4 °C'nin üzerine çıkabileceğini ortaya koymaktadır. Bu durum, özellikle tropikal bölgeler, Akdeniz havzası, Orta Doğu ve Güney Asya gibi hassas coğrafyalarda aşırı hava olaylarının daha sık ve şiddetli biçimde yaşanmasına da neden olmaktadır (IPCC 2023).

Bu tehdit karşısında, Paris Anlaşması kapsamında, küresel sıcaklık artışının 2 °C'nin altında, tercihen 1.5 °C ile sınırlandırılması hedeflenmiştir (UNFCCC 2015). Bu doğrultuda, taraf ülkeler, Ulusal Katkı Beyanları (Nationally Determined Contributions-NDCs) aracılığıyla emisyon azaltım taahhütlerini beyan etmiş, böylece uzun vadede karbon nötr ekonomilere geçiş süreci başlatılmıştır (UNEP 2022).

Hidrolojik döngüde yer alan yağış, buharlaşma ve akış süreçleri arasındaki dengenin bozulması; buzulların erimesi, deniz seviyesinin yükselmesi, sıcak hava dalgalarının hem sıklık hem de şiddet açısından artış göstermesi, bazı bölgelerde aşırı yağışlar ve ani taşkınlar yaşanması, diğer bölgelerde ise kuraklık olaylarının daha sık ve daha şiddetli hale gelmesi gibi etkilerin; ekosistemler, ekonomik sektörler ve insan yaşamı üzerinde önemli sonuçlar doğurması öngörülmektedir (Türkeş 2008).

Sera gazı emisyonlarının azaltılması ve iklim değişikliğine uyum sağlanmasına yönelik politikalar, küresel ölçekte 1990 yılından itibaren gündeme gelmiştir. Uluslararası düzeyde iklim değişikliği ile mücadeleye yönelik kurumsal altyapı, 1992 yılında Brezilya'nın Rio de Janeiro kentinde gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler Çevre ve Kalkınma Konferansı'nda kabul edilen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi (UNFCCC) ile oluşturulmuştur (UNFCCC 1992).

Söz konusu anlaşma, taraf ülkeleri sera gazı emisyonlarını sınırlamak amacıyla ilk kez ortak bir çerçevede bir araya getirmiştir. 1997'de kabul edilen Kyoto Protokolü, gelişmiş ülkelere yasal olarak bağlayıcı emisyon azaltım yükümlülükleri getirmiş ve iklim politikalarında önemli bir dönüm noktası oluşturmuştur (UNFCCC 1998). Ancak, gelişmekte olan ülkelerin benzer yükümlülükleri üstlenmemesi nedeniyle protokolün etkinliği sınırlı kalmıştır. Bunu takiben, 2015 yılında kabul edilen Paris Anlaşması ile küresel sıcaklık artışının 2 °C'nin altında tutulması, mümkünse 1.5 °C ile sınırlandırılması hedeflenmiş ve tüm taraf ülkelerden Ulusal Katkı Beyanları (NDC'ler) sunmaları istenmiştir (UNFCCC 2015). Böylece, iklim değişikliği ile mücadelede daha kapsayıcı ve katılımcı bir süreç başlamıştır.

Ülkemiz, 6 Ekim 2021 tarihinde Paris Anlaşması'nı Türkiye Büyük Millet Meclisi'nde onaylamış ve bu anlaşma 11 Ekim 2021'de Resmî Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Anlaşma kapsamında ülkemiz, gelişmekte olan ülke statüsüyle yükümlülük üstlenmiş ve 2030 yılına kadar referans senaryoya göre sera gazı emisyonlarında %41'e varan bir artıştan azaltım hedefi belirlemiştir (Anonim 2023a). Bu kapsamda Türkiye, sera gazı emisyonlarını izleme, raporlama ve Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'ne düzenli olarak bildirme sorumluluğunu taşımaktadır. Ayrıca, iklim değişikliğine uyum sağlamak amacıyla su yönetimi, tarım, ormanlar ve afet risklerinin azaltılması gibi alanlarda politikalar geliştirmesi beklenmektedir. Türkiye, gelişmekte olan ülke konumuyla Yeşil İklim Fonu gibi uluslararası finansal ve teknik destek mekanizmalarından da yararlanabilmektedir.

Avrupa Birliği'nin 2019 yılında açıkladığı Yeşil Mutabakat, 2050 yılına kadar karbon nötr bir kıta olmayı hedeflerken, bu süreçte ticaret ortaklarına da yeni çevresel yükümlülükler getirmiştir. Türkiye, Avrupa Birliği (AB) ile olan yoğun ticari ilişkileri nedeniyle bu dönüşüm sürecine uyum sağlamak amacıyla 2021 yılında "Yeşil Mutabakat Eylem Planı"nı yayımlamıştır (Anonim 2021a). Söz konusu eylem planı, sera gazı emisyonlarının azaltılması, dögüsel ekonomi uygulamalarının teşvik edilmesi, sürdürülebilir tarım ve ulaşım politikalarının geliştirilmesi gibi başlıklarda somut adımlar kapsamaktadır. Ayrıca Türk sanayi sektörünün karbon sınırlandırma mekanizmasına uyum sağlaması, dijitalleşme yoluyla yeşil dönüşümün desteklenmesi ve ihracatçı firmaların yeni çevresel düzenlemelere hazırlanması, bu sürecin temel hedefleri arasında yer almaktadır. Bu bağlamda Türkiye, çevresel performansını geliştirmeyi hedeflerken, aynı zamanda sürdürülebilirlik ilkeleri doğrultusunda Avrupa Birliği ile ekonomik entegrasyonunu da güçlendirmeyi amaçlamaktadır.

Teknolojideki gelişmeler sayesinde veri toplama, analiz ve modelleme yöntemlerinde kayda değer ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu amaçla iklim değişikliğine önem veren ülkeler; iklim değişikliğinin etkilerinin belirlenmesi, niteliğinin tahmin edilmesi ve etkilerinin azaltılması için yeni politikaların geliştirilmesi ve gerekli tedbirlerin alınması konularında önemli çalışmalar yürütmektedirler.

78 milyon ha yüzölçümüne sahip ülkemiz, kurak ve yarı kurak bölgede yer almakta ve iklim değişikliğinden en fazla etkilenecek ülkeler arasında bulunmaktadır. 24 milyon ha tarım alanı, 8.5 milyon ha sulanabilir alan, 14.6 milyon ha mera alanı ve 23.4 milyon ha orman alanının (Anonim 2024a) iklim değişikliğinden önemli bir şekilde etkilenmesi beklenmektedir.

İklim değişikliğinden en az etkilenmek ve değişimlere daha kolay uyum sağlayabilecek tedbirleri zamanında alabilmek için sistemin işleyişi ve hidrolojik süreç mekanizmasının tanımlanması ile sistemin farklı senaryolara vereceği tepkilerin önceden tahmin edilebilmesi için hidrolojik modellere ihtiyaç duyulmaktadır.

Günümüzde teknolojiye ilerlemelerle birlikte veri toplama, analiz ve modelleme süreçlerinde önemli gelişmeler yaşanmıştır. Bu gelişmeler hem mevcut iklim koşullarının hem de geleceğe yönelik potansiyel risklerin tahmin edilmesinde iklim modellerinin vazgeçilmez hale gelmesini sağlamıştır. İklim sistemini oluşturan atmosfer, okyanuslar, kara yüzeyleri ve biyosfer gibi bileşenler ile bunlar arasındaki karmaşık etkileşimleri temsil eden matematiksel modeller, geçmiş ve günümüz iklimini analiz etmek ve geleceğe yönelik projeksiyonlar üretmek için kullanılmaktadır (IPCC 2021).

Bu bağlamda, farklı sera gazı emisyon seviyelerine dayanan RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları, iklim değişikliğinin küresel ve bölgesel düzeydeki potansiyel etkilerinin değerlendirilmesinde önemli veriler sağlamaktadır (Van Vuuren vd. 2011, O'Neill vd. 2014). Söz konusu senaryolar, özellikle su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve hidrolojik sistemlerin modellenmesi açısından kritik girdiler sunmaktadır.

İklim senaryolarından elde edilen veriler, havza ölçeğindeki hidrolojik modellerle bütünleştirilerek, gelecekte su döngüsünde meydana gelebilecek değişimlerin daha doğru ve güvenilir biçimde tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu açıdan havza modelleri; su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, su kalitesi ve miktarının analizi, yer altı suyu rejiminin korunması, taşkın kontrolü ve kuraklık tahminleri gibi pek çok amaç için kullanılmaktadır. Bu tür modeller, havza ölçeğinde tüm hidrolojik süreçlerin ve

bunların birbiriyle olan ilişkilerinin bütüncül bir yaklaşımla temsil edilmesini gerektirmektedir (Singh ve Woolhiser 2002).

İklim değişikliğinin havzalarda kuraklık üzerindeki etkilerinin sağlıklı biçimde analiz edilebilmesi için, zamansal ve mekânsal değişimlerin eş zamanlı olarak incelenmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu amaçla kullanılan coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ve özellikle ArcGIS programı, iklim senaryolarından elde edilen verileri haritalayarak kuraklığın şiddeti, süresi ve yayılımını görselleştirmeye yardımcı olmaktadır. ArcGIS sayesinde yağış, sıcaklık, toprak nemi gibi veriler kullanılarak kuraklık göstergeleri belirli dönemler için analiz edilerek riskli bölgeler tespit edilebilir ve havza yönetimi için daha etkili planlamalar yapılabilir (AghaKouchak vd. 2015, Esri 2020).

Porsuk Havzası özelinde gerçekleştirilen bu çalışmada, özellikle yağış-akış süreçlerinin modellenmesine yönelik geliştirilmiş fiziksel tabanlı hidrolojik bir model olan HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System) kullanılmıştır. HEC-HMS modeli, havzalarda meydana gelen yağışlara karşı sistemin tepkilerini simüle ederek, havza parametrelerini entegre etmekte ve taşkın, akış ile su temini gibi alanlarda güvenilir tahminler sunmaktadır (USACE 2021). Bu çalışmada, modelin Porsuk Havzası üzerindeki uygulanabilirliği sınanmış ve kuraklık senaryoları çerçevesinde bölgenin hidrolojik tepkileri analiz edilmiştir.

İklim değişikliği, ortalama sıcaklıklardaki artışlara bağlı olarak iklim sistemlerinde gerçekleşen değişimleri ifade etmektedir. İklim değişikliğinin nedeni gelişmenin ve kalkınmanın sonucu her geçen gün artan sera gazları, ormansızlaşma, daha fazla fosil yakıtların kullanılması, endüstriyel işlemler, kömür madenciliği ve tarımsal faaliyetlerdir. Tarım sektörünün sera gazı salınımlarındaki payı, ölçüm yöntemleri ülkelere göre farklılık göstermesine rağmen, küresel ölçekte ortalama %10 ile %12 arasında değişmektedir. Ancak, arazi kullanımı ve hayvancılık dahil edildiğinde bu oran %20'ye kadar çıkabilmektedir (FAO 2022, IPCC 2023). Türkiye'de ise bu oran %12 dir (Anonim, 2024).

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) en güncel raporları, acil müdahale yapılmadığı takdirde iklim değişikliğinin telafisi mümkün olmayan etkilerinin ortaya çıkacağını vurgulamaktadır. Bu doğrultuda, 2080'li yıllara kadar küresel ortalama sıcaklık artışının 2 °C'nin altında tutulabilmesi için tüm ülkelerin sera gazı salımlarını önemli ölçüde azaltmaları zorunludur.

Küresel ısınmanın etkisiyle atmosferdeki buharlaşma süreçleri hız kazanmakta; bu da hem toprak neminde hem de yüzeysel su kaynaklarında kayıpların belirgin şekilde artmasına neden olmaktadır. Bu durum su kaynaklarının azalması, kuraklık olaylarının yoğunlaşması, su ve toprak kalitesinin bozulması, zararlı organizmaların ve hastalıkların yaygınlaşması ile biyolojik çeşitliliğin azalması gibi çevresel sorunları beraberinde getirmektedir. Söz konusu gelişmeler, ekosistemleri ve üretim süreçlerini olumsuz etkileyerek verim kayıplarına yol açmakta ve su ile gıda güvenliğini tehdit etmektedir. İklim değişikliğinin en belirgin etkilerinden biri olan kuraklık ise, özellikle şiddetinin ve süresinin artmasıyla daha da yaygın hissedilmektedir.

Kuraklık, bir bölgedeki yağışların normal seviyelerin altına düşmesiyle ortaya çıkan ve su kaynaklarının azalmasına, tarım arazilerinin bozulmasına ve tarımsal üretimde verim kayıplarına neden olmaktadır. Kuraklık şiddetinin artması ve süresinin uzaması arazi bozulmalarını artırırken ekosistemlerde de telafisi ağır sorunlara yol açabilmektedir.

Küresel ısınmanın etkileriyle birlikte atmosferdeki buharlaşma süreçleri hız kazanmakta; bu durum hem toprakta hem de su yüzeylerinde daha fazla su kaybına yol açmaktadır. Özellikle kurak ve yarı kurak alanlarda toprak neminde azalma gözlenmekte ve bu durum üretim süreçlerini olumsuz etkilemektedir. Ayrıca, yağış rejimindeki düzensizlikler ve bazı bölgelerdeki belirgin azalmalar, öncelikle yüzey sularının azalmasına yol açarken, yeraltı su kaynaklarının yenilenme kapasitesini de sınırlandırmaktadır. Bu gelişmeler, suya dayalı sektörlerde özellikle tarımda verim düşüşlerine ve üretim kayıplarına sebep olarak sosyo-ekonomik zararları artırmaktadır.

Bilindiği gibi iklim değişikliği sadece meteorolojik kuraklığı değil, aynı zamanda hidrolojik, tarımsal ve sosyo-ekonomik kuraklığı da tetiklemektedir.

İklim değişikliğini durdurmak imkansızdır. Ancak iklim değişikliğini yavaşlatmak ve kuraklıkla mücadele edebilmek için uyum ve azaltım tedbirleri hayati önem taşımaktadır. Bu nedenle, öncelikle su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, arazi kullanım planlaması ve iklim dostu tarım uygulamaları gibi bütüncül politikaların hayata geçirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda, yerel ve küresel düzeyde iş birliği, bilimsel verilere dayalı politika geliştirme ve iklim değişikliğine uyum stratejileri ve eylem planları, gelecekte yaşanabilecek kuraklık risklerinin azaltılmasında kilit rol oynayacaktır.

Kuraklık, şiddeti ve süresi açısından farklılık gösterse de genellikle yavaş seyreden ve geniş zaman dilimlerine yayılan bir doğa olayıdır. Kurak dönemlerde sıcaklıkların yükselmesiyle birlikte yağış rejimlerinde düzensizlikler ortaya çıkmakta; bu durum, yerüstü ve yeraltı su kaynaklarında azalmaya, bitki su tüketimi ve sulama suyu ihtiyacının artmasına da neden olmaktadır.

Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı'nın (UNDP) 2007 yılında yayımladığı raporda, Gediz ve Büyük Menderes havzalarına dair kayda değer iklim projeksiyonları yer almaktadır. Söz konusu projeksiyonlara göre, 2030 yılına kadar bu havzalarda sıcaklıkların yaklaşık 1.2 °C artması ve yağışların %5 oranında azalması beklenmektedir. UNDP'nin 2007 tarihli çalışmasına göre, 2050 yılı itibarıyla sıcaklıkların 2 °C düzeyine ulaşması ve yağış miktarlarında yaklaşık %10 oranında bir azalma yaşanması öngörülmektedir. Raporda ayrıca, 2030, 2050 ve 2100 yıllarına yönelik olarak hem yüzeysel su kaynaklarında beklenen azalmalar hem de tarımsal su talebinde ortaya çıkabilecek artışlar kapsamlı biçimde ele alınmıştır (UNDP 2007).

Bu gelişmeler, toprak ve su kaynaklarının yanı sıra tarımsal üretimin niceliğini ve niteliğini doğrudan etkilemektedir. Kuraklığın uzun süreli ve şiddetli seyretmesi ise arazi bozulumunu hızlandırmakta olup çölleşme sürecini tetiklemektedir.

Kuraklığın doğru tahmini, kuraklıktan kaynaklı sosyo-ekonomik sorunların çözülmesinde ve önlem alınmasında önemli ölçüde rol oynamaktadır. Kuraklık nedeni ile artan su ihtiyacına cevap verebilmek için toprak ve su kaynaklarının etkin bir şekilde planlanması ve yönetilmesi gerekmektedir.

Kuraklığın gerçekleşme zamanı, süresi ve etkilerinin doğru şekilde tahmin edilmesi, tarımsal faaliyetlerin etkin planlanması açısından da büyük önem taşımaktadır. Böylece, ürünlerin ekim-dikim zamanları, uygulanacak üretim yöntemleri, ekilecek ürün çeşitleri, sulama yöntemi ve verilecek su miktarı gibi unsurlar önceden belirlenerek gerekli düzenlemeler yapılabilecektir. Bu çerçevede, kurak dönemlerde su ihtiyacının kontrol altına alınması ve su kaynaklarının daha verimli ve sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesi mümkün hale gelecektir.

Kuraklık, insanlık tarihi boyunca medeniyetlerin kaderini belirleyen en önemli doğal afetlerden biri olmuştur. Mezopotamya, Maya ve Harappan uygarlıklarının çöküşünde uzun süreli kuraklıkların etkili olduğu bilimsel araştırmalarla ortaya konmuştur (Cook vd. 2016). Günümüzde küresel iklim değişikliğinin etkileriyle birlikte kuraklık olayları daha sık görülmekte, daha uzun süreli ve daha şiddetli hale gelmektedir. Nitekim 2022 yılında Avrupa’da yaşanan kuraklık, son beş yüzyılın en ağır kuraklığı olarak kayıtlara geçmiştir (Copernicus Climate Change Service 2022). İklim senaryoları, özellikle Akdeniz Havzası gibi yarı kurak bölgelerde kuraklığın daha da yoğunlaşacağını ve su kıtlığının yaygınlaşacağını göstermektedir (IPCC 2021). Bu durum hem doğal ekosistemler hem de tarım, su güvenliği ve toplumsal yapılar açısından ciddi tehditler oluşturmaktadır.

Son yıllarda dünya genelinde iklim değişikliğiyle birlikte kuraklık olaylarının sıklığı ve şiddeti artış göstermiştir. Özellikle 2011 yılında Doğu Afrika’da yaşanan kuraklık, 13 milyondan fazla insanı etkileyerek ciddi bir insani krize yol açmıştır (FAO 2011). Aynı şekilde, Amerika Birleşik Devletleri'nin batı bölgelerinde son yıllarda görülen kuraklıklar, tarımsal üretimi olumsuz etkilemiş, su kaynakları üzerindeki baskıyı artırmıştır (IPCC 2021). Kuraklık, yalnızca tarım ve gıda güvenliği üzerinde değil, aynı zamanda enerji üretimi, ekosistem hizmetleri ve su kaynaklarının yönetimi gibi birçok sektörde zincirleme etkiler yaratmaktadır.

Türkiye'de ise 2007, 2013-2014 ve 2017 yıllarında yaşanan kuraklıktan sonra 2020-2021 yıllarında yaşanan kuraklık, özellikle İç Anadolu, Güneydoğu Anadolu ve Ege bölgelerinde tarımsal üretimi ciddi bir şekilde etkilemiştir. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) verilerine göre, bu dönemde birçok bölgede yağış miktarı mevsim normallerinin %50'sine kadar düşmüştür (Anonim 2021b). Kuraklık, buğday, arpa gibi temel ürünlerde rekolte kaybına neden olmuş, çiftçilerin gelirini azaltmış ve gıda fiyatlarında artışa yol açmıştır. Buna ek olarak, barajlardaki doluluk oranlarının düşmesi, içme suyu temininde çeşitli sorunların yaşanmasına neden olmuş ve bu durum, su yönetimi politikalarının sürdürülebilirliği konusunu yeniden gündeme getirmiştir.

Kuraklığın etkilerinin azaltılması ve risklerin yönetilmesi amacıyla, birçok ülkede olduğu gibi Türkiye'de de ulusal düzeyde stratejiler ve eylem planları yürütülmektedir. Tarım ve Orman Bakanlığı koordinasyonunda hazırlanan "Ulusal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planı" çerçevesinde, il düzeyinde kuraklık kriz merkezleri oluşturulmuş ve sektörel kuraklık eylem planları hazırlanarak yerel düzeyde risk azaltıcı uygulamalar hayata geçirilmiştir (Anonim 2017a). Ayrıca, kuraklıktan zarar gören üreticilerin ekonomik açıdan desteklenmesi amacıyla TARSİM kapsamında kuraklık verim sigortası uygulamaları genişletilmiş, Ziraat Bankası ve Tarım Kredi Kooperatiflerine olan kredi borçlarının faizleri ertelenmiş ve çeşitli finansal kolaylıklar sağlanmıştır. Bu tür önlemler, kuraklık gibi yavaş gelişen ama yıkıcı etkiler oluşturan afetlerle başa çıkma kapasitesini artırmayı hedeflemektedir. Kuraklık strateji ve eylem planlarının başarılı olabilmesi için tahminlerinin doğru yapılması ve model çıktılarının eylem planlarına entegre edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu araştırmada, Porsuk Havzası'nda gelecekte yaşanması olası kuraklık koşulları, RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryoları çerçevesinde analiz edilmiştir. Özellikle 2050, 2075 ve 2100 yıllarını temsil eden projeksiyon dönemleri için hem meteorolojik hem de hidrolojik kuraklıkların süresi, şiddeti ve mekânsal dağılımları öngörülmüştür. Meteorolojik kuraklıkların değerlendirilmesinde Standart Yağış İndeksi (SPI), hidrolojik kuraklıkların belirlenmesinde ise akım verilerine dayalı olarak geliştirilen Standart Akım İndeksi (SRI) kullanılmıştır. HEC-HMS hidrolojik modeli kullanılarak senaryo dönemlerine ilişkin akım simülasyonları üretilmiş; bu simülasyonlara dayanılarak

Standart Akım İndeksi (SRI) analizleri uygulanmıştır. Böylece, havza ölçeğinde gelecekte karşılaşılması muhtemel hidrolojik kuraklıkların sıklığı ve şiddeti detaylı biçimde değerlendirilmiştir.

Elde edilen hidrolojik ve meteorolojik kuraklık göstergeleri, sayısal yükseklik modeli (DEM), yükseklik haritaları, toprak özellikleri ve uzun dönemli iklim verileri ile birlikte ArcGIS ortamında analiz edilerek, kuraklık risk haritaları oluşturulmuştur. Bu haritalar sayesinde, kuraklığın mekânsal ve zamansal dağılımı detaylı biçimde incelenmiş; özellikle yüzey akışın azaldığı, yeraltı suyu yenilenmesinin zorlaştığı ve tarımsal sulamanın risk altına girdiği bölgeler tespit edilmiştir. Bu analizler, havzanın kırılğan su kaynaklarına sahip alanlarının ortaya konulmasında önemli rol oynamaktadır.

Çalışma ayrıca, 2030–2100 yılları arasında ortaya çıkması muhtemel kuraklıkların etkilerinin miktar ve boyut olarak değerlendirilmesine olanak sunmaktadır. Hidrolojik kuraklıkların, yüzey suyu rezervuarları, baraj işletme rejimleri ve tarımsal sulama sistemleri üzerindeki potansiyel etkileri analiz edilmiş; bu doğrultuda, su kaynaklarının çok boyutlu stres altında kalacağı dönemler belirlenmiştir. Kuraklık koşullarının bitki su tüketimleri, sulama ihtiyacı ve tarımsal üretkenlik üzerindeki etkilerini öngörebilmek amacıyla, kısa, orta ve uzun vadeli uyum stratejilerine ihtiyaç duyulduğu ortaya konmuştur.

Sonuç olarak, çalışmada ileri düzey modelleme ve coğrafi bilgi sistemleri kullanılarak kuraklığın erken izlenmesi, değerlendirilmesi ve haritalanması sağlanmış; bu kapsamda kuraklık yönetimi, erken uyarı sistemleri ve kurumsal kapasitenin geliştirilmesine yönelik öneriler sunulmuştur. Aynı zamanda, kuraklık stresine dayanıklı bitki ıslahı ve tarımsal risk yönetimi uygulamalarının güçlendirilmesi de çalışmanın önerdiği stratejik adımlar arasındadır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI VE KURAMSAL TEMELLER

2.1 Küresel ve Bölgesel İklim Değişikliği Çalışmaları

İklim değişikliği, son yıllarda gerek bilimsel araştırmalarda gerekse ulusal ve uluslararası politika belgelerinde giderek daha fazla önem kazanan küresel bir sorun olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu olgu, yalnızca atmosferik parametrelerdeki değişiklikleri değil, aynı zamanda ekosistemler, ekonomik yapılar ve toplumsal dengeler üzerindeki çok yönlü etkileriyle de dikkat çekmektedir. Son yıllarda iklim sisteminde meydana gelen sıcaklık yükselişleri, yağış dağılımındaki düzensizlikler ve ekstrem hava olaylarının artışı, doğal kaynakların sürdürülebilir kullanımını tehdit eden çevresel baskıların başlıca nedenleri arasında yer almaktadır. Bu değişimlerin en kritik yansımalarından biri ise kuraklık olaylarının daha sık ve daha şiddetli şekilde ortaya çıkmasıdır.

Türkiye'nin yarı kurak ve kurak iklim kuşaklarında yer alan birçok havzası, iklim değişikliğine bağlı stres faktörlerine karşı yüksek düzeyde duyarlılık sergilemektedir. Özellikle su kaynaklarının mevsimsel ve yıllık dengesizliği, bu bölgelerdeki ekosistemleri ve tarımsal üretim potansiyelini tehdit eder niteliktedir (Türkeş 2019). Özellikle Porsuk Havzası gibi hidrolojik dengenin hassas olduğu alanlarda yapılan çalışmalar hem mevcut koşulların hem de gelecekteki eğilimlerin detaylı analizini gerekli kılmaktadır. Bu bağlamda, literatürde yer alan güncel araştırmaların sentezlenmesi, iklim değişikliği-kuraklık ilişkisini daha iyi anlamak ve bu ilişkiden doğan riskleri minimize etmek adına bilimsel temelli politika önerilerinin geliştirilmesini mümkün kılmaktadır.

Aggarwal (2008), küresel iklim değişikliğinin özellikle gelişmekte olan ülkelerdeki tarımsal üretim üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirdiği çalışmasında, 1906–2005 yılları arasında dünya genelinde ortalama sıcaklığın yaklaşık 0.74 °C arttığını, Mevcut projeksiyonlara göre, 21. yüzyılın sonlarına doğru küresel ortalama sıcaklıklarda 1.8 °C ile 4.0 °C arasında bir artış meydana gelmesi öngörülmektedir. Farklı sera gazı emisyon düzeylerini esas alan çeşitli iklim modelleri, ısınma eğiliminin yüzyıl sonuna dek devam edeceğini ve bu sürecin benzer sonuçlarla projekte edildiğini ortaya koymaktadır. Bu beklenti, emisyon senaryolarına dayalı öngörülerin güvenilirliğini güçlendirmektedir

(IPCC 2014). Çalışmada, Hindistan’da iklim değişikliğine bağlı olarak 2100 yılına kadar bitkisel üretimde %10 ile %40 arasında kayıpların yaşanabileceği öngörülmüştür Sıcaklık artışları, yağış rejimlerinde meydana gelen düzensizlikler, su kaynaklarının giderek azalması ve buharlaşma oranlarındaki yükseliş, mevcut su stresinin temel belirleyicileri arasında gösterilmektedir. Bu çevresel değişkenlerin birlikte değerlendirilmesi, su yönetimi açısından önemli bir kırılma noktası ortaya koymaktadır Aggarwal’ın çalışması, iklim değişikliğinin tarım sektörü üzerindeki etkilerine dair önemli bir uyarı niteliği taşımakta; gıda güvenliği, kırsal geçim kaynakları ve adaptasyon politikalarının planlanması açısından kritik veriler sunmaktadır.

Dai vd. (2020), Çin’in Huai Nehri Havzası’nda tarımsal sulamada su kullanım verimliliğini artırmaya yönelik olarak iklim değişikliğini dikkate alan entegre bir uyum modeli geliştirmişlerdir. 2021-2050 yıllarını kapsayan çalışmada, RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryolarına dayalı iklim verileri CMIP5 modelinden elde edilmiştir. Doğrusal olmayan programlama ile oluşturulan optimum bitki deseninde damla sulama yöntemi uygulandığında, RCP 4.5 senaryosunda iklim değişiminin olumsuz etkilerinin azaltılabileceği görülmüştür. Su verimliliği her iki senaryoda da azalma göstermiş (%4.56 ve %6.51), bu durumun buğday ve mısır üretim alanlarında daralma ve dış ticarete düşüş gibi ekonomik sonuçlar doğurabileceği belirtilmiştir. Geliştirilen yaklaşımın farklı havzalara da uygulanabilir olduğu vurgulanmıştır.

Elagib vd. (2019), çevresel tehditlerin giderek arttığı günümüzde, kentlerin su, enerji ve gıda sistemleri arasındaki karşılıklı bağımlılıkları incelemiştir. Araştırma, özellikle kuraklık koşulları altında su kaynaklarının azalmasıyla birlikte tarımsal üretkenliğin ve enerji arzının nasıl etkilendiğini detaylandırmaktadır. Çalışma, sürdürülebilir şehir yönetimi için bu üçlü ilişkiyi birlikte ele alan bütüncül bir yaklaşımın gerekliliğini vurgulamaktadır. Su-enerji-gıda bağlantısının, iklim değişikliğine karşı dirençli sistemler geliştirilmesinde kritik bir rol oynadığı ifade edilmektedir.

Ekinci ve Ökde (2021), Yozgat’ta gerçekleştirdikleri çalışmada, yerel liderlerin iklim değişikliği konusundaki algılarını inceleyerek, kırsal alanların bu çevresel tehdit karşısındaki kırılma noktası düzeyini ortaya koymuşlardır. Çalışma, kırsal toplulukların iklim

değişikliğinin getirdiği risklere karşı hem bilgi hem de kurumsal kapasite açısından yetersiz kaldığını göstermektedir. Benzer biçimde, Demircan (2018) Türkiye'deki akademik çalışmalara dayanarak kentleşme ve iklim değişikliği arasındaki ilişkiye dikkat çekmiş; özellikle kent yönetişiminin güçlendirilmesinin, iklim değişikliğine uyum politikalarının başarısı açısından kritik olduğunu vurgulamıştır. Her iki çalışma da kırsal ve kentsel düzeyde iklim değişikliğiyle mücadelede yapısal dönüşüm ihtiyacına işaret etmektedir.

Newman ve Noy (2023), iklim değişikliğine bağlı olarak artan aşırı hava olaylarının, küresel ekonomik sistem üzerindeki yıkıcı etkilerine dikkat çekmiş ve bu olayların neden olduğu finansal kayıpların yalnızca ekonomik değil söz konusu durumun sosyal ve politik etkilerle de şekillendiğini vurgulamışlardır. Araştırma, bu etkilerin etkin ve kararlı iklim politikalarıyla büyük ölçüde azaltılabileceğini ortaya koymaktadır.

Turp vd. (2014), Türkiye'nin olası iklim senaryolarını değerlendirmek amacıyla, 1970–2000 yıllarına ait gözlemsel verilerden hareketle 2020–2050 dönemine yönelik sıcaklık ve yağış eğilimlerini incelemişlerdir. Araştırmada IPCC tarafından tanımlanan RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları doğrultusunda bölgesel düzeyde değerlendirmeler yapılmıştır. Modelleme sonuçlarına göre, belirtilen dönem boyunca Türkiye genelinde sıcaklıklarda 0.5 °C ile 4 °C arasında bir artış öngörülmüş; buna karşın günlük ortalama yağış miktarında 0.4 mm/gün ile 1.2 mm/gün arasında azalma tahmin edilmiştir. Bu bulgular, özellikle yarı kurak iklim kuşağında yer alan bölgeler için gelecekteki su kaynakları yönetimi açısından önemli ipuçları sunmaktadır.

Twinomuhangi vd. (2019), Uganda'da yürüttükleri araştırmada, iklim değişikliğine yönelik yerel politika planlarının küçük ölçekli çiftçilerin iklime uyum sağlamaya dönük uygulamaları benimsemesi üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Elde edilen veriler, iklim uyum planlarının yer almasına karşın uygulamaya yansıyan somut bir dönüşümün gerçekleşmediğini ve özellikle yerel düzeyde yönetişimsel ve yapısal boşlukların bulunduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, politika oluşturma ile sahadaki uygulama arasındaki kopukluğun, iklime dirençli tarım stratejilerinin etkinliğini sınırladığını göstermektedir.

Yıldırım ve Everest (2020), iklim değişikliği ve yenilenebilir enerji alanlarında tarımsal kooperatiflerin farkındalık düzeylerini ölçmek amacıyla Çanakkale ili özelinde bir alan araştırması yürütmüştür. Elde edilen bulgular, kooperatif üyeleri arasında çevresel farkındalığın artırılmasının, iklim değişikliğine yönelik yerel ölçekte geliştirilecek uyum stratejilerinin başarısında belirleyici olduğunu göstermektedir. Bu durum, tarım sektöründeki paydaşların bilinç düzeyinin artırılmasının iklimle ilgili risklere karşı daha hazırlıklı bir yapının inşasına katkı sağlayabileceğini ortaya koymaktadır.

2.2 İklim Değişikliğinin Su Kaynakları ve Hidrolojik Süreçlere Etkisi

Arnell (2004), iklim değişikliği senaryolarının küresel su kaynakları üzerindeki olası etkilerini değerlendirmek amacıyla hidrolik modeller kullanarak akış rejimlerindeki değişimleri analiz etmiş ve su stresi göstergeleriyle birlikte farklı bölgesel sonuçlar elde etmiştir. Fant vd. (2016) ise hem sosyoekonomik büyüme hem de iklim değişikliği projeksiyonlarını dikkate alan entegre bir modelleme yaklaşımı geliştirerek, gelecekteki su stresi düzeylerini tahmin etmeye çalışmıştır. Bu çalışmalar, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından senaryo bazlı analizlerin ve çok bileşenli modelleme tekniklerinin önemini vurgulamaktadır.

Aydın ve Kemeç (2023), iklim değişikliğinin sulak alanlardaki ekolojik sistemler üzerinde yarattığı etkileri ortaya koyarken, bu alanların insan baskısı ve doğal dinamiklerdeki bozulmalar nedeniyle daha savunmasız hale geldiğini vurgulamışlardır. Çalışmada, iklim değişiminin tarımsal üretim alanlarına yansıyan olumsuz etkilerinin, sürdürülebilir yönetim stratejileriyle hafifletilebileceği belirtilmiş; özellikle su kaynaklarının planlı kullanımı ve arazi kullanım politikalarının yeniden değerlendirilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır.

Bae vd. (2008), Güney Kore'deki su kaynaklarının iklim değişikliği karşısında gösterebileceği tepkileri değerlendirmek amacıyla, yüksek çözünürlüklü iklim simülasyonlarına dayalı kapsamlı bir çalışma yürütmüşlerdir. Bu analiz, gelecekteki hidrolojik koşullara ilişkin bölgesel öngörülerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu yaklaşımla, gelecekteki hidrolojik eğilimler hakkında bölgesel düzeyde öngörülerde

bulunulmuştur. Çalışma, farklı iklim senaryoları altında su kaynakları üzerindeki değişimleri tahmin ederken, bu tahminlerin yüksek düzeyde belirsizlik taşıdığına dikkat çekmektedir. Bu nedenle, karar vericilerin gelecekteki su yönetim politikalarını oluştururken senaryo çeşitliliğini ve model belirsizliklerini dikkate almalarının kritik olduğu vurgulanmaktadır.

Batisani (2011), Botsvana'daki geçici akarsu sistemlerini inceleyerek iklim değişkenliğinin mekânsal ve zamansal yansımalarını analiz etmiştir. Araştırma, özellikle yarı kurak bölgelerde iklim kaynaklı akış değişimlerinin su kıtlığını artırabileceğini ve bu durumun yerel su yönetimi stratejilerini daha kırılgan hale getirebileceğini ortaya koymaktadır. Bulgular, su kaynaklarının gelecekteki sürdürülebilirliği açısından iklim projeksiyonlarının dikkate alınmasının zorunlu olduğunu göstermektedir.

Burns ve arkadaşları (2007), Catskill Dağları bölgesindeki son iklim eğilimlerini ve bunların su kaynakları üzerindeki olası etkilerini değerlendirerek, değişen hidrolojik koşullarla başa çıkmak için uyarlanabilir yönetim stratejilerine duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Çakmak ve Gökalp (2011), küresel ısınma, hızlı nüfus artışı ve kentleşmenin su kaynakları üzerindeki baskısını ele alarak tarımsal üretim açısından ortaya çıkan riskleri değerlendirmiştir. Çalışmada, sınırlı su kaynakları için tarımsal sektörün sanayi, şehirleşme ve çevresel kullanım alanlarıyla rekabet ettiği, artan taleplerin yeraltı sularını tükettiği ve su ekosistemlerini kirlettiği vurgulanmaktadır. Türkiye'de mevcut su kaynaklarının yaklaşık %75'inin tarımsal sulamada kullanıldığı dikkate alındığında, etkin su kullanımının ve tasarrufun özellikle sulamada kritik öneme sahip olduğu belirtilmiştir. Bu doğrultuda basınçlı borulu sistemlerin ve özellikle damla sulamanın yaygınlaştırılmasının gerekliliği öne çıkarılmıştır. Çalışmada ayrıca iklim değişikliğinin tarım ve kuraklık üzerindeki etkileri tartışılmış ve suyun daha verimli kullanılmasına yönelik öneriler sunulmuştur.

Freund vd. (2017), Karadeniz Havzası özelinde gerçekleştirdikleri analizde, gelecekteki iklim senaryoları ve arazi kullanımı değişikliklerinin su kaynakları üzerindeki etkilerini

değerlendirmiştir. Araştırma, bölgedeki hidrolojik döngülerin zamanla nasıl değişebileceğini öngörerek, bu değişimlerin etkili bir şekilde yönetilebilmesi için kapsamlı ve bütünlük su kaynakları yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Çalışma, özellikle iklim değişikliğine uyum açısından, havza ölçeğinde entegre yaklaşımların ne derece kritik olduğunu vurgulamaktadır.

Görgüner ve Kavvas (2020), Türkiye'nin Akdeniz iklim bölgesinde iklim değişikliğinin tarımsal sulama üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla, aylık dinamik su dengesi modelinden yararlanarak hem geçmiş hem de gelecek dönemlere ilişkin rezervuar su potansiyelini analiz etmiştir. CMIP5 arşivinden seçilen CCSM4, GFDL-ESM2M, HadGEM2-ES ve MIROC5 küresel modelleri ile RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları kullanılarak elde edilen iklim verileri temelinde, yüzey akışı, buharlaşma ve FAO'nun Penman–Monteith yöntemiyle belirlenen sulama suyu ihtiyaçları hesaplanmıştır. Sekiz farklı projeksiyon setinden yedisinde, 2100 yılına kadar rezervuar kapasitelerinin sulama talebini karşılamayacağı sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmada, su kaynakları üzerindeki baskının en fazla RCP 8.5 senaryosu kapsamında artış gösterdiği saptanmıştır. Bu bulgular, Akdeniz havzasında iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki baskısının tarımsal üretim sürdürülebilirliği açısından kritik olduğunu göstermektedir.

Groves vd. (2008), Güney Kaliforniya bölgesinde gerçekleştirdikleri araştırmada, iklim değişikliğinin orta vadede su kaynakları ve su talebi üzerindeki muhtemel etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada 2040 yılına yönelik yapılan projeksiyonlar doğrultusunda, bölgedeki su talebinin yaklaşık %10 oranında artacağı, buna karşın mevcut bölgesel su kaynaklarının %40 oranında azalacağı öngörülmüştür. Ayrıca araştırmada, sürdürülebilir yeraltı su kaynaklarının verimliliğinde %15'e varan bir düşüş yaşanabileceği belirtilmiştir. Bu durum, iklim değişikliğine bağlı olarak hem su arzında hem de yeraltı su rezervlerinin yenilenebilirliğinde ciddi bozulmalar meydana gelebileceğine işaret etmektedir. Groves ve arkadaşları, bu sonuçların özellikle kurak bölgelerde entegre su yönetimi ve adaptif planlama yaklaşımlarının önemini ortaya koyduğunu vurgulamışlardır. Araştırma, gelecekte su yönetimi politikalarının iklim değişkenliğini dikkate alarak yeniden yapılandırılması gerektiğini ve hem yüzeysel hem de yeraltı su

kaynaklarının sürdürülebilirliğinin güvence altına alınmasının zorunlu hale geleceğini ortaya koymaktadır.

Hamidi vd. (2021), iklimsel değişkenliklerin su kaynakları üzerindeki etkilerini analiz etmiş ve bu doğrultuda gelecekte uygulanabilecek yönetim politikalarına yönelik çözüm önerileri ortaya koymuştur. Araştırmada, iklim senaryolarına dayalı öngörüler doğrultusunda sürdürülebilir su yönetimi stratejilerinin benimsenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Ayrıca, önerilen yaklaşımların yalnızca çalışmanın yapıldığı bölgeye değil, benzer iklim ve hidrolojik koşullara sahip ülkeler, özellikle Türkiye için de uygulanabilir nitelikte olduğu ifade edilmiştir. Bu yönüyle çalışma, iklim değişikliğine karşı dirençli bir su yönetimi sisteminin geliştirilmesine yönelik önemli katkılar sunmaktadır.

Hayaloğlu (2018), iklim değişikliğinin tarım sektörü üzerindeki ekonomik etkilerini incelemek amacıyla gerçekleştirdiği çalışmada, 1996–2016 dönemine ait verileri kullanarak “Küresel İklim Değişikliği Risk Endeksi”ne göre en çok etkilenecek on ülkeyi analiz etmiştir. Çalışmada panel veri yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analiz, iklim değişikliğinin tarım sektörü ve genel ekonomik büyüme üzerinde negatif etkilere neden olduğunu ortaya koymuştur.

Kaini vd. (2021), Koshi Nehir Havzası’nda iklim değişiminin hidrolojik rejim üzerindeki etkilerini üç ayrı dönem kapsamında (kısa dönem: 2016–2045, orta dönem: 2036–2065, uzun dönem: 2071–2100) değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, tüm dönemlerde ortalama nehir akışının artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu artışın, özellikle pirinç ve kışlık buğday üretim alanlarının genişletilmesi açısından fırsatlar sunabileceği belirtilmiştir. Ayrıca, pirinç ekim zamanının bir ay geciktirilerek haziran yerine temmuz–ağustos aylarına kaydırılmasının, kış mevsimindeki yağışlardan daha fazla yararlanmak açısından uygun bir adaptasyon stratejisi olabileceği önerilmiştir. Kang vd. (2009), küresel iklim değişikliğinin olası etkilerini değerlendiren yüksek çözünürlüklü küresel ve bölgesel iklim modellerinin sonuçlarını incelemiştir. Bu modellere dayalı çalışmalarda, sıcaklıkların genel olarak artacağı, yağışlarda ise bölgesel farklılıklar görüleceği; bazı bölgelerde artış, bazı bölgelerde ise azalış yaşanacağı öngörülmektedir.

Araştırma, iklim değişikliğinin tarım sektörü üzerindeki etkilerinin büyük ölçüde toprak-su dengesi ve su verimliliği ile ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle toprak su dengesinin bitki aleyhine bozulduğu alanlarda, bitkisel üretimin olumsuz yönde etkileneceği belirtilmiştir. Bu bağlamda, su tutma kapasitesi yüksek toprakların, iklim değişikliğine karşı daha dirençli olduğu ve bu tür alanlarda tarımsal sürdürülebilirliğin korunabileceği ifade edilmiştir.

Kwon vd. (2018), Güney Kore’de çeşitli kuraklık türlerinin zaman içindeki yayılımını analiz ederek, meteorolojik, tarımsal ve hidrolojik kuraklıklar arasındaki ilişkilerin su kaynakları üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışma, kuraklıkların bütüncül biçimde sınıflandırılması ve izlenmesinin, etkili su yönetimi politikalarının oluşturulmasında kritik rol oynayacağını vurgulamaktadır.

Panday (2018), Hindistan’daki Yamuna Nehri Havzası özelinde iklim değişikliğinin hidrolojik rejim üzerindeki etkilerini ele almıştır. Çalışma, değişen sıcaklık ve yağış desenlerinin nehir akışlarına olan etkilerini analiz ederek, iklim değişkenliklerinin su kaynakları yönetimi üzerindeki potansiyel risklerini ortaya koymuştur. Araştırmada, gelecekteki belirsizliklerin doğru biçimde değerlendirilebilmesi için su kaynaklarının entegre ve kapsamlı bir şekilde modellenmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Çalışma, su yönetiminde esneklik ve sürdürülebilirliği esas alan politikaların oluşturulmasının, gelecekteki iklimsel belirsizliklerle başa çıkmada önemli bir gereklilik olduğuna işaret etmektedir.

Piao vd. (2010), Çin’de su kaynakları ve tarım üzerindeki iklim değişikliği etkilerini ele alarak, gelecekte ortaya çıkabilecek zorluklarla başa çıkabilmek için bölgesel su depolama ve yönetim altyapısının güçlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Poyraz (2018), Ege ve Akdeniz bölgelerinde CORDEX verileriyle SPI analizi yaparak uzun dönemli kuraklık eğilimlerini belirlemiştir. Çalışma, 1972–2100 dönemini kapsamakta olup, özellikle Batı Anadolu’da kuraklığın şiddetinin artış göstereceğine dair önemli kanıtlar sunmaktadır.

Taş vd. (2020), Konya Kapalı Havzası'nda hidrolojik kuraklıkların gelecekteki olası seyrini incelemek amacıyla Standart Yağış İndeksi (SPI) kullanarak uzun dönemli bir analiz gerçekleştirmiştir. Çalışma kapsamında IPCC tarafından önerilen RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryolarına dayalı olarak HadGEM2 küresel iklim modeli ile 2100 yılına kadar havza genelinde yağış tahminleri üretilmiştir. Bu verilere dayanarak, RCP 4.5 senaryosu altında altı, RCP 8.5 senaryosu altında ise dört ayrı hidrolojik kuraklık dönemi öngörülmüştür. Özellikle Karaman alt havzasını da kapsayan bu araştırma, gelecekte karşılaşılabilecek su yönetimi risklerinin anlaşılmasına katkı sağlaması açısından önemli görülmekte ve bu tür projeksiyon temelli çalışmaların, sürdürülebilir su politikalarının geliştirilmesinde yol gösterici olabileceği ifade edilmektedir.

Özdemir vd. (2022), Sakarya Havzası'nda yürüttükleri analizde, kuraklık süreçlerinin su kalitesinde meydana getirdiği değişimleri belirlemeye yönelik kapsamlı bir değerlendirme yapmışlardır. Araştırma bulgularına göre, azalan su akışı, özellikle nehir debilerinin düşmesiyle birlikte kirlilik konsantrasyonlarında belirgin artışlara neden olabilmektedir. Bu durum hem içme suyu kaynaklarının sürdürülebilirliği hem de ekosistem sağlığı açısından riskler oluşturmakta ve kurak dönemlerde su yönetimi stratejilerinin gözden geçirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Yağbasan (2016), tarafından gerçekleştirilen araştırma, Küçük Menderes Havzası'nı ele alarak iklim değişiminin yer altı suyu yenilenmesine nasıl yansıdığını incelemiştir. Araştırmada, özellikle azalan yağış miktarı ve artan buharlaşma oranlarının, yer altı su kaynaklarının yenilenmesini olumsuz yönde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır. Buna paralel olarak Özdemir vd. (2022), içme suyu havzalarında hem arazi kullanımındaki değişikliklerin hem de iklim değişikliğinin, akış rejimleri ile birlikte yayılı (noktadan olmayan) kirlilik yükleri üzerinde önemli etkiler yarattığını ortaya koymuşlardır. Her iki çalışmada da iklim koşullarındaki değişkenliğin su kaynakları üzerindeki baskısını azaltmak adına entegre ve ileriye dönük planlama gerektiren su yönetim politikalarının önemini vurgulamaktadır.

Wada vd. (2011), iklim değişikliğinin küresel su stresi üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla model tabanlı bir analiz gerçekleştirmiştir. Araştırmada,

değişen yağış rejimleri ve sıcaklık eğilimlerinin hem su mevcudiyeti hem de sulama suyu talebi üzerindeki belirleyici etkilerine dikkat çekilmiştir. Bulgular, özellikle tarımsal sulamada artan ihtiyaçların ve sınırlı su kaynaklarının, bölgesel su dengesizliklerini daha da derinleştirebileceğini ortaya koymaktadır. Bu bağlamda çalışma, iklim temelli senaryolara dayalı su kaynakları planlamasının önemini vurgulamaktadır.

Wade vd. (2013), Araştırma, insan kaynaklı su tüketim eğilimlerinin dünya genelinde hidrolojik kuraklık riskini artırdığını ortaya koymakta ve bu durumun ancak etkin su yönetimi stratejileriyle kontrol altına alınabileceğini savunmaktadır. Sheffield vd. (2004), ABD için toprak nemine dayalı simüle edilmiş bir kuraklık analizi yaparak, doğru kuraklık izleme sistemlerinin etkin tarımsal yönetim açısından kritik olduğunu ortaya koymuştur.

2.3 Kuraklık Analizleri ve İndeks Uygulamaları

İklim değişikliğinin gelecekte ortaya çıkarabileceği kuraklık risklerini bilimsel temellere dayalı olarak öngörebilmek için gelişmiş modelleme yaklaşımlarına başvurulmaktadır. Bu bağlamda, küresel iklim modelleri (GCM) ile bunların yerel ölçeklere uyarlanmasını sağlayan bölgesel iklim modelleri (RCM), uzun dönemli iklim projeksiyonlarının hazırlanmasında önemli araçlar olarak kullanılmaktadır. Geleceğe yönelik senaryo tabanlı çalışmaların temelinde ise, sera gazı emisyon düzeylerine göre farklı iklim sonuçlarını modellemeyi mümkün kılan Temsili Konsantrasyon Yolları (RCP) yer almakta ve bu çerçevede IPCC tarafından geliştirilmiştir (IPCC 2014). Türkiye özelinde yürütülen birçok çalışmada RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları kullanılarak kuraklık eğilimleri değerlendirilmiştir; bu senaryoların, kuraklıkla mücadele politikalarının şekillendirilmesinde yol gösterici bir referans sunduğu görülmüştür (Demircan 2017; Türkeş 2020).

Akçapınar ve Çakmak (2022), son yıllarda yağışların azalması nedeniyle kuraklık riski taşıyan bölgelerden biri olan Ankara'nın Ayaş ilçesinde kuraklık durumunu değerlendirmiştir. Çalışmada potansiyel evapotranspirasyon değerleri FAO-Penman Monteith, Blaney-Criddle, Hargreaves-Samani ve Thorntwaite yöntemleriyle

hesaplanmış, yıllık ortalama evapotranspirasyona en yakın tahminin Blaney-Criddle yöntemiyle elde edildiği belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak Su Yılı bazında Standartlaştırılmış Yağış-Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI), Palmer Kuraklık Şiddeti İndeksi (PDSI) ve Palmer Hidrolojik Kuraklık İndeksi (PHDI) ile kuraklık analizleri yapılmış ve 37 yıllık dönemde ilçenin sık sık kurak dönemler yaşadığı ortaya konulmuştur. Özellikle SPEI sonuçlarına göre 2 yıl olağanüstü, 5 yıl çok şiddetli; PDSI ve PHDI'ye göre ise 1 yıl olağanüstü, 7 yıl çok şiddetli kuraklık tespit edilmiştir. Araştırma hem farklı evapotranspirasyon tahmin yöntemlerinin hem de kuraklık indekslerinin karşılaştırmalı değerlendirilmesi açısından önemli bulgular sunmaktadır.

Aksu ve Yaltı (2019), Türkiye'nin doğusunda yer alan Iğdır ili için kuraklık koşullarını çeşitli kuraklık indisleri üzerinden analiz etmiştir. Çalışmada uzun dönemli yağış ve sıcaklık verileri değerlendirilmiş, özellikle yaz dönemlerinde belirgin kuraklık eğilimleri tespit edilmiştir. Bulgular, bölgenin iklimsel açıdan kırılganlığını ortaya koyarken, tarımsal üretim üzerinde kuraklığın ciddi bir tehdit oluşturduğunu da göstermektedir. Araştırmacılar, elde edilen sonuçların su kaynaklarının yönetimi ve sürdürülebilir tarımsal planlama açısından dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu çalışma, bölgesel ölçekte kuraklığın zamansal ve mekânsal değişimlerini ortaya koyarak literatüre önemli katkılar sağlamaktadır.

Alsenjar vd. (2022), Karadeniz Bölgesi'nde yürüttükleri çalışmada üç aylık zaman ölçeğinde kuraklık koşullarını değerlendirmek için Standardize Yağış İndeksi (SPI) ile Standardize Yağış-Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI) kullanmıştır. Yirmi meteoroloji istasyonuna ait veriler üzerinden yapılan analizlerde bu iki indeks arasında oldukça güçlü bir korelasyon tespit edilmiştir. Kıyı bölgelerinde korelasyon katsayısının 0.93 ve üzerinde olduğu, iç kesimlere doğru gidildikçe ise nispeten azaldığı belirlenmiştir. En yüksek korelasyon deniz kenarındaki Rize istasyonunda ($r= 0.98$), en düşük korelasyon ise iç kesimde bulunan Gümüşhane istasyonunda ($r= 0.82$) saptanmıştır. Bu bulgular, kuraklık indekslerinin seçimi ve uygulanmasında bölgesel iklim koşulları ile veri mevcudiyetinin dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Anlı (2014) çalışmasında, kurak ve yarı kurak bölgelerde sınırlı su kaynaklarının yönetimi açısından kıyas bitki su tüketimindeki (ET_0) zamansal değişimlerin analizi ele alınmıştır. Güneydoğu Anadolu Bölgesi şehirlerinde yürütülen bu araştırmada ET_0 , Penman-Monteith yöntemiyle hesaplanmış ve elde edilen veriler dört farklı kıyas periyoduna (k1, k2, k3, k4) ayrılarak değerlendirilmiştir. Zaman serilerindeki eğilimler, parametrik Dickey-Fuller ve parametrik olmayan Mann Whitney U testleriyle incelenmiş; sonuçlar ET_0 değerlerinde anlamlı değişimlerin bulunduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, meteorolojik kuraklık değerlendirmesinde kullanılan RDI (Reconnaissance Drought Index) yöntemine göre bölge genelinde hafif kuraklık koşullarının baskın olduğu, ancak belirli dönemlerde orta ve şiddetli kuraklık olaylarının da görüldüğü tespit edilmiştir.

Anlı (2017), yarı kurak Konya Kapalı Havzası'nda kıyas bitki su tüketiminin (ET_0) zamansal değişimini ve SPEI yöntemiyle bölgesel kuraklık durumunu incelemiştir. Penman-Monteith yöntemiyle hesaplanan ET_0 verileri farklı zaman ölçeklerinde değerlendirilmiş, ADF ve Mann-Whitney U testleri sonucunda artış eğilimleri saptanmıştır. SPEI bulguları genel olarak hafif kuraklığın egemen olduğunu, ancak orta ve şiddetli kuraklıkların da önemli ölçüde görüldüğünü göstermiştir. Ayrıca SPEI'nin RDI'ye göre aşırı kuraklıkları belirlemede daha duyarlı olduğu vurgulanmıştır.

Apaydın vd. (2004), Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) Bölgesi'nde farklı iklim parametrelerinin mekânsal dağılımını belirlemek amacıyla altı farklı enterpolasyon tekniğini karşılaştırmıştır. Çalışmada güneşlenme süresi, güneş radyasyonu, sıcaklık, bağıl nem, rüzgâr hızı ve yağış olmak üzere altı iklim değişkeni ele alınmış ve 1971–1999 dönemine ait gözlem verileri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre sıcaklık, güneş radyasyonu, bağıl nem ve rüzgâr hızı için en düşük hata değerlerini basit cokriging yöntemi sağlamış, güneşlenme süresi ve yağış için ise tamamen düzenlenmiş spline yöntemi daha başarılı bulunmuştur. Araştırma, bölgesel iklim analizlerinde doğru enterpolasyon tekniğinin seçilmesinin sonuçların güvenilirliği açısından kritik olduğunu göstermektedir.

Apurv vd. (2017), yürüttüğü araştırma, kuraklık tipleri arasındaki geçiş ilişkisini ele almış; meteorolojik kuraklıkların zamanla hidrolojik ve tarımsal boyutlara dönüştüğünü

ortaya koymuştur. Bu zincirleme süreç, kuraklığın su kaynakları ve tarım üzerindeki kümülatif etkilerini ortaya koymaktadır.

Bachmair vd. (2017), kuraklık risk yönetimini geliştirmek amacıyla kuraklık etkisi fonksiyonlarının oluşturulmasının önemine dikkat çekmektedir. alışmaları, ekolojik tepki verilerinin izleme sürecine entegre edilmesini savunarak, kuraklık etkilerinin yerel ölçekte daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunabilecek daha hedefe yönelik bir izleme yaklaşımı önermektedir.

Blauhut vd. (2015), Avrupa'da kuraklık riskine yönelik haritaların oluşturulması sürecinde kuraklık indislerini sahadan raporlanan etkilerle ilişkilendirmiştir. Araştırma, özellikle tarım sektörünün hafif ve orta Őiddetteki kuraklık olaylarına karşı yüksek derecede kırılgan olduğunu ortaya koymakta; bu durum, erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi ve etkili müdahale stratejilerinin uygulanmasının gerekliliğini göstermektedir.

Circi ve Irmak (2022), Marmara Bölgesi zeline SPI analizi ile kuraklık değişimlerini ortaya koymuştur. Bulgular, bölgesel düzeyde farklılıklar gösteren kuraklık eğilimlerinin tarımsal faaliyetler açısından kritik etkiler yaratabileceğini ortaya koymaktadır.

Danandeh vd. (2020), Ankara havzasında RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına göre SPI ve SPEI indekslerini uygulayarak geleceğe dönük kuraklık riskini değerlendirmiştir. Elde edilen bulgular, özellikle RCP8.5 senaryosu altında kurak dönemlerin daha uzun ve yoğun olabileceğini göstermiştir.

elik ve Yakar (2024), tarafından gerçekleştirilen analizde, Mersin ili örneğinde çeşitli kuraklık göstergeleri incelenmiş ve iklim değişiminin kuraklık eğilimlerini güçlendirdiği sonucuna varılmıştır. Bu durumun, özellikle suya dayalı tarımsal üretim sistemleri üzerinde baskıyı artıracadı ve sürdürülebilir üretimi tehdit edebileceği belirtilmektedir. Her iki çalışmada tarım ve su yönetiminin iklim değişikliği bağlamında yeniden yapılandırılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Eris vd. (2020), Küçük Menderes Havzası'nda meteorolojik kuraklığı hem zamansal hem de mekânsal boyutlarıyla incelemiş ve farklı kuraklık indeksleri kullanarak bölgenin kuraklık dinamiklerini ortaya koymuştur. Çalışmada yıllık ölçekte Boyutsuz Yağış Anomali İndeksi (DPAI) kullanılırken, aylık ölçekte yağışa dayalı Standardize Yağış İndeksi (SPI) ile yağış ve sıcaklığı birlikte dikkate alan Standardize Yağış-Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI) değerlendirilmiştir. Beş meteoroloji istasyonuna ait veriler üzerinden yapılan analizlerde, havzanın tarihsel kurak dönemleri doğru biçimde tanımlanmış ve elde edilen sonuçlar zaman serileri, kuraklık risk grafikleri ve şiddet haritalarıyla desteklenmiştir. Araştırma, kolay erişilebilir meteorolojik verilerden türetilen bu tür indekslerin hem bilimsel açıdan hem de karar vericiler, paydaşlar ve uygulayıcılar için su tahsisi çalışmaları ile kuraklık yönetim planlarında önemli bir araç olabileceğini göstermektedir.

Ersoy (2022), Türkiye'nin farklı havzalarında CMIP5 tabanlı iklim senaryoları doğrultusunda SPI uygulamaları yaparak 2071–2100 periyoduna ilişkin kuraklık frekanslarını incelemiştir. Sonuçlara göre, güney ve batı bölgelerinde kuraklık süresi ve şiddetinde belirgin bir artış söz konusudur.

Gümüş ve Aşın (2016), Seyhan ve Ceyhan Havzalarını kapsayan çalışmasında meteorolojik ve hidrolojik kuraklık verilerini bir arada ele alarak, bölgenin su potansiyeli açısından taşıdığı kırılganlıkları irdelemiştir. Araştırma, gelecekteki olası kuraklıkların etkilerinin azaltılabilmesi için kapsamlı bir kuraklık hafifletme planının geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Araştırma, söz konusu planların yerel su yönetim yaklaşımlarıyla eşgüdüm içinde hayata geçirilmesinin, iklimsel tehditlere karşı daha esnek ve uyarlanabilir bir yapı geliştirilmesinde etkili olabileceğini ortaya koymuştur.

Ghulam vd. (2007), klasik kuraklık indekslerinin sınırlılıklarını aşmak amacıyla geliştirdikleri Modifiye Dik Açılı Kuraklık İndisi (MPDI) ile, kuraklık koşullarının daha ayrıntılı ve yüksek mekânsal çözünürlükte izlenmesine imkân tanıyan yenilikçi bir yöntem ortaya koymuşlardır. Bu yöntem, önceki kuraklık indekslerine kıyasla daha yüksek mekânsal çözünürlük ve detay sunarak özellikle hassas alanların izlenmesinde önemli avantajlar sağlamaktadır.

Kurtoğlu ve Keskin (2024), Samsun ili özelinde yürüttükleri çalışmalarında, Standart Yağış İndeksi (SPI) yöntemini kullanarak bölgesel düzeyde bir kuraklık analizi gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada, IPCC tarafından önerilen RCP senaryoları doğrultusunda gelecekte sıcaklık artışlarının belirginleēeēi, buna paralel olarak yağış rejimlerinde de kayda değer değişikliklerin yaşanacağı öngörülmektedir. Bu iklimsel değişikliklerin, özellikle tarım faaliyetleri üzerinde olumsuz etkiler yaratacağı ve yerel ölçekte üretim planlamasında dikkate alınması gerektiği vurgulanmaktadır.

Soydan ve Beden (2024), Burdur Havzası özelinde gerçekleştirdikleri araştırmada, Standart Yağış İndeksi (SPI) ve Keşif Kuraklık İndeksi (RDI) gibi iki önemli kuraklık indisini kullanarak bölgedeki kuraklık eğilimlerini değerlendirmiştir. Çalışma, kuraklık şiddetinin hem mevcut hem de gelecekteki su kaynakları planlaması ve yönetimi açısından belirleyici bir faktör olduğunu vurgulamaktadır. Elde edilen bulgular, özellikle su arz-talep dengesinin sağlanması ve tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliğinin korunması adına kuraklık verilerinin dikkate alınmasının gerekliliğine işaret etmektedir.

Sönmez vd. (2005), Türkiye genelinde kuraklık eğilimlerini değerlendirmek amacıyla Standart Yağış İndeksi (SPI) yöntemini kullanarak kuraklığın hem zamansal hem de mekânsal dağılımını analiz etmişlerdir. Araştırma, kuraklık olaylarının sıklığı, süresi ve şiddeti gibi karakteristik özelliklerinin ayrıntılı biçimde anlaşılmasının, su kaynaklarının sürdürülebilir ve etkin yönetimi açısından kritik olduğunu vurgulamaktadır. Çalışma, özellikle tarım gibi iklime duyarlı sektörlerin planlamasında, kuraklık verilerinin karar süreçlerine entegre edilmesinin gerekliliğine dikkat çekmektedir.

Sun vd. (2019), Çin'deki Huai Nehri Havzası'nı ele alarak hidrolojik kuraklıkların mekânsal ve zamansal dinamiklerini istatistiksel yöntemlerle analiz etmiştir. Çalışma, kuraklık rejimlerinin olasılıksal yapısını ortaya koyarak, su yönetimi politikalarının gelecekteki iklim koşullarına göre uyarlanmasının önemine dikkat çekmektedir. Bulgular, özellikle kuraklık süresi ve şiddeti gibi parametrelerin su kaynaklarının planlanmasında göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermektedir.

Taş ve Yıldırım (2019), Konya Kapalı Havzası'nda gelecekte yaşanması muhtemel tarımsal kuraklık dönemlerini öngörmek amacıyla HadGEM2 küresel iklim modeli verilerini kullanarak bir analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmada RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları doğrultusunda 2100 yılına kadar aylık yağış verileri Standardize Yağış İndeksi (SPI) ile değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, her iki senaryo kapsamında havzada dörder adet kuraklık dönemi tespit edilmiştir. RCP 4.5 senaryosunda 2043–2044, 2046–2047, 2086–2087 ve 2090–2091 dönemlerinde; RCP 8.5 senaryosunda ise 2060–2062, 2072–2074, 2092–2094 ve 2095–2097 yılları arasında tarımsal kuraklık yaşanacağı öngörülmektedir. Bu çalışma, iklim senaryolarının tarımsal kuraklık riskinin zamanlaması ve sıklığı üzerindeki etkilerini vurgulaması açısından önemli bir örnek teşkil etmektedir.

Tijdeman vd. (2022), farklı kuraklık türlerinin mekânsal ve zamansal çeşitliliğini inceleyerek, kuraklıkların bölgesel etkilerinin değişkenlik gösterdiğini ve bu durumun daha kapsamlı bir analiz yaklaşımını gerekli kıldığını savunmuştur.

Vicente-Serrano vd. (2012), kuraklık izleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan meteorolojik, tarımsal ve hidrolojik kuraklık indislerini karşılaştırmalı olarak analiz etmiştir. Araştırma, farklı uygulama alanlarında kullanılan bu indislerin her birinin özgün avantaj ve sınırlılıklarına dikkat çekerek, kuraklıkların etkili şekilde izlenebilmesi için daha kapsamlı ve entegre araçların geliştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Su kaynaklarının yönetiminde karar alma süreçlerini destekleyecek güvenilir göstergelerin belirlenmesi, çalışmanın temel vurgularındandır.

Zhang vd. (2024), küresel ölçekte kuraklıktan toparlanma süreçlerini ve bunun yağış değişimlerine tepkisini olasılıkla bir değerlendirme modeliyle inceleyerek, şiddetli kuraklıkların uzun süren toparlanma süreçlerine yol açarak tarımsal üretimde ciddi kayıplara neden olabileceğini göstermektedir.

2.3.1 Kuraklık ve Türkiye’de kuraklık yönetimi

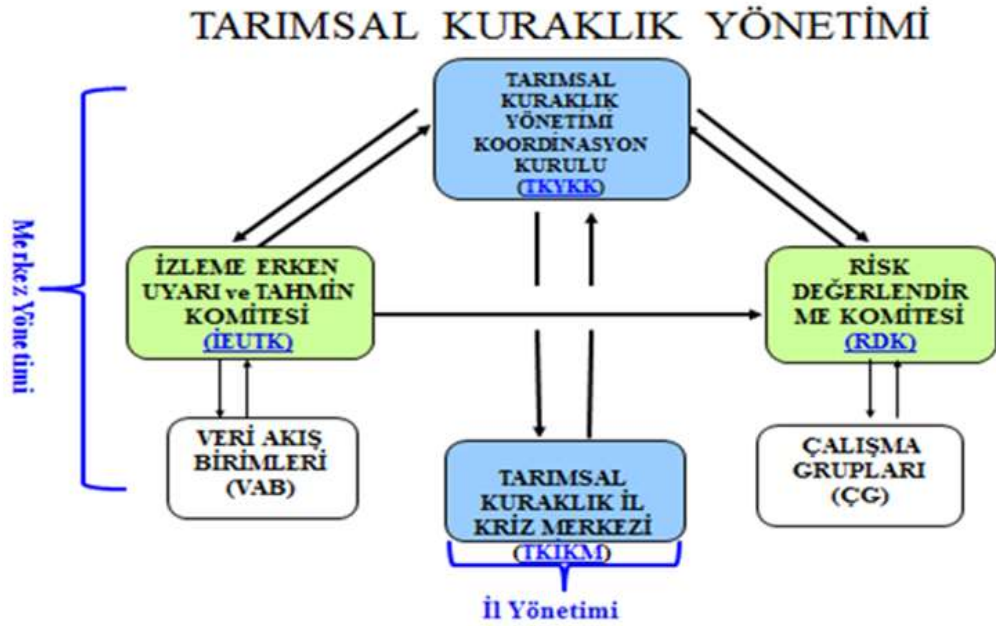
Kuraklık, küresel iklim değişikliğinin en belirgin sonuçlarından biri olarak yağış rejimindeki bozulma, sıcaklık artışları ve buharlaşmadaki yükselme üzerinden su kaynakları ile tarımsal üretim üzerinde artan bir baskı oluşturmaktadır. Süreklilik kazanan kurak dönemler; tarımsal verimde düşümlere, toprak özelliklerinde bozulmalara ve ekosistem bileşenleri arasındaki dengenin zayıflamasına yol açarak hem doğal sistemleri hem de insan faaliyetlerini doğrudan etkilemektedir (FAO 2017, IPCC 2021).

Literatürde kuraklık; atmosferik süreçlerden su kaynaklarına ve toplumsal-etkinlik boyutuna uzanan bir yelpazede, meteorolojik, tarımsal, hidrolojik ve sosyo-ekonomik boyutlarıyla ele alınmaktadır. Bu sınıflama, kuraklığın yalnızca yağış eksikliği ile sınırlı olmayan, üretim sistemleri, su yönetimi ve ekonomik-sosyal yapı üzerindeki etkilerinin bütüncül biçimde değerlendirilmesine imkân tanımaktadır (UNCCD 1994, Wilhite 2000).

Kuraklık, toplumun her kesimini etkileyen ve kurumlar arası iş birliği gerektiren önemli bir doğal afettir. Bu nedenle, farklı kurumların yürüttüğü izleme çalışmaları, etkili ve entegre bir kuraklık yönetimi için büyük önem taşımaktadır. Bu çerçevede, ülkemizde çeşitli kurumlar tarafından farklı kuraklık türlerine ilişkin izleme çalışmaları gerçekleştirilmektedir.

Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), ülkemizde kuraklık izleme çalışmalarının merkezinde yer alan en önemli kurumdur. MGM, ülke genelindeki meteorolojik gözlem istasyonlarından topladığı yağış, sıcaklık, nem ve buharlaşma gibi verilerle meteorolojik kuraklık analizleri yapmaktadır. Bu veriler doğrultusunda Standart Yağış İndeksi (SPI), Normal Yağış Yüzdesi İndeksi (PNI), Z-Skoru ve Yüzey Suyu Stres İndeksi (SSI) vb. gibi bilimsel yöntemlerle kuraklık şiddeti ve süresi hesaplanarak aylık ve yıllık kuraklık haritaları yayımlanmaktadır. MGM’nin düzenli olarak sağladığı bu bilgiler, erken uyarı sistemlerinin temelini oluşturmakta ve diğer ilgili kurumlara veri desteği sağlamaktadır.

Tarım ve Orman Bakanlığı, özellikle tarımsal kuraklığın izlenmesi ve etkilerinin azaltılması konusunda görev yapmaktadır. Bakanlık bünyesinde geliştirilen Tarımsal Kuraklık İzleme Sistemi ile 2008 yılından beri meteorolojik veriler tarım sektörüyle ilişkilendirilmekte ve olası üretim riskleri değerlendirilmektedir. Ayrıca, Bakanlık koordinasyonunda ilgili Bakanlık, Kurum ve Kuruluşlarının katılımı ile “Tarımsal Kuraklık Yönetimi Koordinasyon Kurulu” oluşturulmuş, İzleme Erken Uyarı ve Tahmin Komitesi, Risk Değerlendirme Komitesi ile il düzeyinde de kuraklık kriz merkezleri kurulmuştur (Şekil 2.1). 2008 yılından beri 5 yıllık Ulusal Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planları (2008-2012, 2013-2017, 2018-2022 ve 2023-2027) kapsamında sektörel eylem planları hazırlanarak yerelde uygulanmaya başlanmıştır. Tarım ve hayvancılık alanında yaşanan kayıpların azaltılması amacıyla çiftçilere yönelik destekleme ve telafi politikaları da yine bu kurum tarafından yürütülmektedir



Şekil 2.1 Tarımsal kuraklıkla yönetimi şeması (Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planı) (Anonim 2023b)

Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM), Türkiye genelinde kuraklık risklerini azaltmak amacıyla havza bazlı kuraklık yönetim planları hazırlamaktadır. Şu ana kadar 25 nehir havzasının büyük çoğunluğu için bu planlar tamamlanmış, kalan havzalarda ise çalışmalar sürmektedir.

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) ise Türkiye'nin yerüstü ve yeraltı su kaynaklarını izlemekten sorumlu ana kurumdur. DSİ, hidrolojik kuraklıkların etkilerini değerlendirmek amacıyla baraj doluluk oranlarını, gölet seviyelerini, akarsu debilerini ve yeraltı suyu seviyelerini sürekli olarak izlemektedir. Kurak dönemlerde sulama programlarını yeniden düzenlemekte, kritik havzalarda su tahsislerini gözden geçirmekte ve su kullanımında önceliklendirme stratejileri geliştirmektedir. Böylece su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından kritik bir rol üstlenmiştir.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), kuraklığın sosyo-ekonomik etkilerini izleyen kurumsal bir yapıdır. Tarımsal üretim, ürün verimliliği, hayvancılık verileri ve gıda fiyat endeksleri gibi ekonomik göstergeleri toplayarak analiz etmektedir. Bu veriler, kuraklık sonrası oluşan ekonomik kayıpların boyutlarını ortaya koymada ve politika geliştirmede kullanılmaktadır. TÜİK'ten elde edilen veriler aynı zamanda kuraklık risk yönetimi planlarının sosyo ekonomik boyutunun değerlendirilmesinde önemli bir kaynak oluşturmaktadır.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı (AFAD), kuraklığı yavaş gelişen doğal afet olarak tanımlayarak kriz ve afet yönetimi planlamasında değerlendirmektedir. AFAD, özellikle uzun süreli kuraklıkların toplumsal etkileri, kırsal nüfus göçü, kıtlık tehdidi ve içme suyu teminindeki zorluklar gibi durumlarda müdahale ederek, il düzeyindeki kriz yönetim planlarının koordinasyonunu sağlamaktadır. Ayrıca, ulusal afet risk azaltma planlarında kuraklık riskinin entegrasyonuna yönelik çalışmalar yürütmektedir.

TARSİM (Tarım Sigortaları Havuzu), kuraklık kaynaklı tarımsal üretim kayıplarını finansal açıdan güvence altına almak amacıyla devlet destekli kuraklık verim sigortası uygulamaktadır. Özellikle kuru tarım yapılan bölgelerde bu sigorta, çiftçilerin kuraklık nedeniyle yaşadığı gelir kaybını kısmen telafi etmeyi amaçlamaktadır. TARSİM, MGM ve Tarım ve Orman Bakanlığı'ndan temin ettiği veriler doğrultusunda sigorta risk analizlerini gerçekleştirerek zarar tespit süreçlerini yürütmektedir.

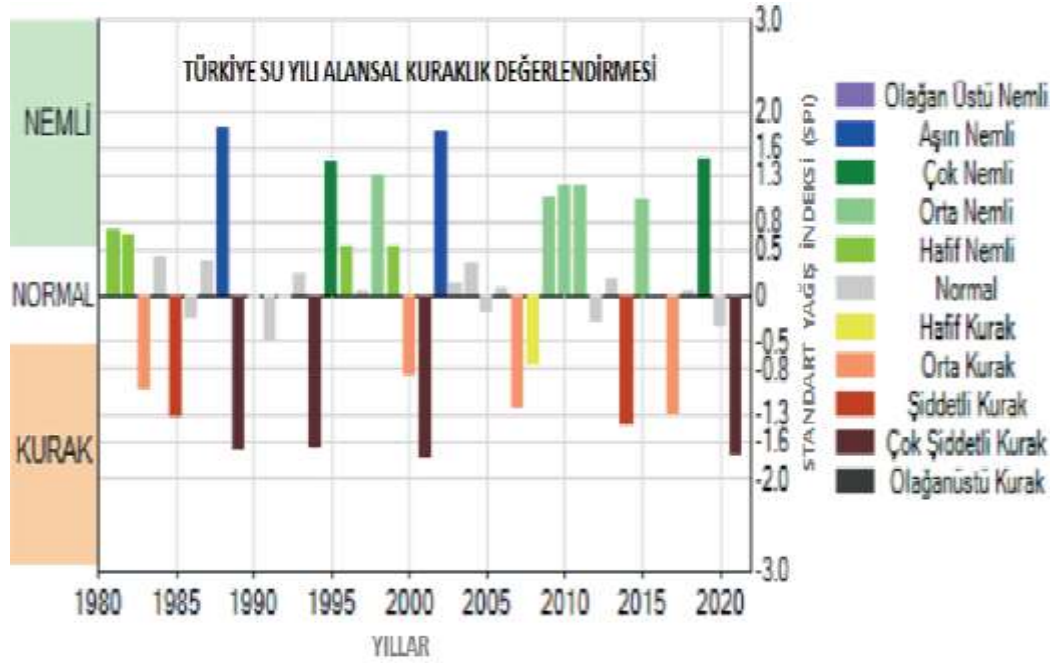
Akademik kurumlar ve araştırma merkezleri ise Türkiye'de kuraklıkla ilgili bilimsel araştırmalar, modellemeler ve senaryo çalışmaları yürüten önemli yapılardır.

Üniversiteler, TÜBİTAK ve TAGEM gibi kuruluşlar aracılığıyla geçmiş ve geleceğe yönelik kuraklık analizleri yapılmakta; iklim değişikliği projeksiyonlarına göre kuraklık riski haritaları ve adaptasyon stratejileri geliştirilmektedir. Bu çalışmalar, politika yapıcı kurumlara bilimsel dayanak sağlamanın yanı sıra kamuoyunun bilinçlendirilmesine de katkı sunmaktadır.

Bu kurumlar arasında özellikle MGM, uzun dönemli iklim verilerine dayalı olarak hazırladığı kuraklık haritaları ve indeks analizleriyle ülke genelinde meteorolojik ve tarımsal kuraklığın izlenmesinde temel referans kurumu konumundadır. MGM tarafından yürütülen çalışmalar, kuraklık eğilimlerinin geçmişten günümüze karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesini mümkün kılmakta ve karar vericiler için kritik bilgiler sunmaktadır. Bu çerçevede, MGM'nin 1980–2020 dönemini kapsayan izleme sonuçları, Türkiye'de kuraklık olaylarının sıklığı, şiddeti ve mekânsal dağılımı hakkında önemli bulgular ortaya koymaktadır.

Türkiye'de tarımsal kuraklık, son yıllarda periyodik olarak yaşanan şiddetli kuraklık olayları nedeniyle önemli bir izleme ve değerlendirme alanı haline gelmiştir. 1980'lerden itibaren yaşanan 1989, 1994, 2001, 2007–2008, 2013–2014 ve 2020–2021 yıllarındaki kuraklıklar, özellikle İç Anadolu ve Güneydoğu Anadolu Bölgeleri'nde tarımsal üretim üzerinde ciddi etkiler yaratmıştır (Anonim 2021b).

Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün (2021) 1980–2020 yıllarını kapsayan kuraklık analizine göre, bu 41 yıllık sürede 11 yıl kurak, 13 yıl nemli, 17 yıl ise normal iklim koşullarıyla geçmiştir. Ancak özellikle 2010'lu yıllardan itibaren, rekor sıcaklıklarla birlikte kuraklık olaylarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 Türkiye kuraklık değerlendirmesi 1980-2020 (Anonim 2021b)

İklim değişikliği, su kaynaklarını azaltarak sadece çevresel sürdürülebilirliği değil, aynı zamanda tarımsal üretimi ve gıda güvenliğini de tehdit etmektedir. Artan sıcaklıklar ve azalan yağışlar, özellikle sulamaya dayalı tarım alanlarında verim kayıplarına yol açmakta; bu durum üretim maliyetlerini artırarak gıda arzını azaltmakta ve fiyatları yükseltmektedir. Özellikle kırılgan bölgelerde yaşayan düşük gelirli gruplar için bu gelişmeler, gıdaya erişimi zorlaştırmakta ve iklim kaynaklı su krizlerini doğrudan gıda krizlerine dönüştürmektedir.

Porsuk Havzası'nda yapılan geçmiş çalışmalar, havzanın iklim değişikliğine bağlı olarak tarımsal kuraklık açısından yüksek risk altında olduğunu göstermektedir (Anonim 2022). Bölgedeki yağış rejiminin değişmesi ve kuraklık frekansının artması, havzadaki tarım ve su yönetimi politikaları için kritik bir faktör olacaktır.

2.4 İklim Değişikliğinin Tarımsal Üretim ve Gıda Güvenliğine Etkisi

Abdi-Dehkordi vd. (2017), İran'daki Aidogmush Nehir Havzası'nda, iklim değişikliğinin etkileri altında tarımsal gelirleri maksimize etmeyi amaçlayan bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Çalışmada, 2026-2039 dönemine yönelik iklim projeksiyonları HADCM3

küresel iklim modeli ile elde edilmiş; yüzey suyu potansiyeli IHACRES hidroloji modeliyle analiz edilmiştir. Artan sulama suyu ihtiyacını dikkate alarak, optimum bitki deseni belirlemek amacıyla genetik algoritmalar içeren bir matematiksel model MATLAB yazılımı aracılığıyla uygulanmıştır. Bitki su tüketim hesaplamaları için CROPWAT programı kullanılmış ve sonuçlar, gelecekte havzadaki sulama ihtiyaçlarında belirgin bir artış olacağını ortaya koymuştur.

Azrak ve Şaylan (2019), Trakya Bölgesi'ne bağlı Edirne, Tekirdağ ve Kırklareli illerinde yürüttükleri çalışmada, iklim değişikliğinin bitkisel su ihtiyacı üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmiştir. ECHAM5 küresel iklim modeli ve A1B emisyon senaryosu temel alınarak 2015–2040 dönemine ait iklim verileri türetilmiş, elde edilen veriler doğrultusunda farklı yöntemlerle bitki su tüketimi projeksiyonları hazırlanmıştır. Tüm yöntemlerin sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, Trakya Bölgesi genelinde bitki su tüketiminde %9 ila %14 arasında artış yaşanacağı öngörülmüştür. Araştırmacılar, iklim senaryoları ve farklı hesaplama yöntemlerinin birlikte kullanıldığı bu tür çalışmaların, bölgesel su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi ve ileriye dönük tarımsal planlama açısından önemli bilgiler sunduğunu vurgulamaktadır.

Çakmak ve Gökalp (2013), sulamanın yalnızca tarımsal üretimde değil, aynı zamanda gıda güvenliğinin sağlanmasında da kritik bir rol oynadığını vurgulamaktadır. Özellikle kurak ve yarı kurak iklim kuşağında yer alan Türkiye'de küresel ısınma nedeniyle kuraklık riskinin arttığı, buna bağlı olarak yağışların azalması sonucunda mevcut su kaynaklarının daralacağı öngörülmektedir. Bu durum, en fazla suyun kullanıldığı sektör olan tarımda etkin su kullanımını zorunlu kılmaktadır. Bu doğrultuda, basınçlı sulama yöntemlerinin yaygınlaştırılması, kısıtlı sulama uygulamaları, suyun ölçülerek kullanıcıya dağıtılması ve tüketim miktarına göre ücretlendirilmesi gibi politikaların yanı sıra, kapalı borulu sistemler ile iletim ve dağıtımda kayıpların azaltılması önemli yapısal ve teknik önlemler olarak öne çıkmaktadır.

Daccache vd. (2011), nemli iklim koşullarında patates üretiminde iklim değişikliğine bağlı parametrelerin etkilerini değerlendirmişlerdir. Araştırma kapsamında, 2050 yılına kadar olan süreci kapsayan iklim verileri IPCC'nin A1FI ve B1 senaryolarına göre

üretmiş ve söz konusu veriler SUBSTOR-Potato modeli kullanılarak analiz edilmiştir. İngiltere'nin dört farklı bölgesinde yürütülen simülasyonlar, iklim değişikliğinin sulama suyu ihtiyacını %14 ila %30 oranında artıracığını; buna karşın su kullanım etkinliğinde %10 ila %22 arasında azalma yaşanacağını ortaya koymuştur. Çalışma, özellikle nemli iklim bölgelerinde dahi iklim değişikliğinin su yönetimi üzerindeki baskısını artıracığını ve tarımsal verimliliğin korunabilmesi için sulama stratejilerinin gözden geçirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Daryanto vd. (2016), küresel ölçekte yürüttükleri çalışmada, küresel düzeyde yaptıkları araştırmada kuraklığın mısır ve buğday üretimi üzerindeki etkilerini zaman serileri üzerinden analiz ederek dönemsel farklılıklara dikkat çekmişlerdir. Özellikle üreme döneminde yaşanan kuraklıkların, büyüme dönemi kuraklıklarına kıyasla daha ciddi verim kayıplarına neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bu bulgu, iklimsel stresin mahsul gelişim evrelerine göre etkilerinin farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Türkiye özelinde yapılan bir diğer araştırmada Oğuz vd. (2022), Nevşehir bölgesinde yaşanan kuraklıkların tahıl verimi üzerindeki etkilerini incelemiş ve kuraklığın özellikle ulusal düzeyde tahıl üretiminde dikkate değer düşüslere neden olduğunu belirlemiştir. Her iki çalışmada tarımsal üretimin sürdürülebilirliği açısından kuraklık dönemlerinin zamanlamasının ve etkilerinin dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır.

Deressa vd. (2009), Etiyopya'da iklim değişikliğinin tarımsal gelirler üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında, mevsimsel sıcaklık ve yağış değişimlerinin üretim ekonomisini önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymuşlardır. Yaz ve kış aylarında sıcaklık artışı gelirleri düşürürken, bahar aylarında yağış artışının gelir üzerinde olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir. Küresel iklim modellerine dayalı projeksiyonlara göre, 2050 ve 2100 yıllarında tarımsal net gelirden azalma beklenmektedir; bu azalışın 2100 yılında daha belirgin olacağı ifade edilmiştir.

Gondim vd. (2009), Brezilya'nın kuzeydoğusundaki yarı kurak Jaguaribe Nehir Havzası'nda iklim değişikliğinin sulama suyu gereksinimine etkisini incelemişlerdir. HadCM3 ve PRECIS modelleriyle A2 ve B2 senaryoları kullanılarak, 1961–1990 kontrol dönemi ile 2040 projeksiyonları karşılaştırılmıştır. Referans bitki su tüketimi sıcaklık

verileriyle hesaplanmış; sonuçlara göre, 2040 yılında A2 senaryosunda %18.7, B2 senaryosunda ise %22.2 oranında sulama suyu ihtiyacı artışı öngörülmüştür. Çalışma, iklim değişikliğinin sulama yönetimi üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır.

Gosling ve Arnell (2013), iklim değişikliğinin dünya genelindeki su kıtlığı üzerindeki olası etkilerini kapsamlı biçimde ele almış ve farklı senaryolar doğrultusunda risk düzeylerini analiz etmişlerdir. Çalışmada farklı iklim modelleri ve senaryoları kullanılarak, gelecekte su kıtlığına maruz kalabilecek nüfus büyüklükleri tahmin edilmiştir. Bulgular, bazı iklim projeksiyonlarında su kıtlığının azalmasından çok artış gösterdiğini ve kıtlık artışına maruz kalacak nüfusun, azalma yaşayacaklardan daha fazla olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuç, önceki araştırmaların aksine, iklim değişikliğinin su stresi üzerindeki etkilerinin daha karmaşık ve ciddi boyutlarda olabileceğine işaret etmektedir.

Gürkan (2015), yüksek lisans tezinde Türkiye’de iklim değişikliğinin ayçiçeği verimi üzerindeki olası etkilerini incelemiştir. Araştırma kapsamında, ayçiçeği üretiminin yoğunlaştığı 29 il temel alınmış; 1985 ile 2014 yılları arasındaki dönemden elde edilen verim ve iklim verileri değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Geleceğe yönelik projeksiyonlar için HadGEM2-ES küresel iklim modeli ve RCP 8.5 senaryosu temel alınarak, 2016–2099 dönemi için 20 km çözünürlüklü iklim verileri üretilmiştir. Bu veriler doğrultusunda yapılan analizlerde, iklim değişikliğinin ayçiçeği verimi üzerinde belirgin etkiler oluşturacağı ortaya konmuştur. Özellikle Ege, İç Anadolu, Marmara ve Karadeniz bölgelerinde verim üzerinde olumsuz etkilerin daha fazla hissedileceği öngörülmektedir. Çalışma, ayçiçeği gibi iklim hassasiyeti yüksek ürünlerde adaptif tarım stratejilerinin önemine dikkat çekmektedir.

Hanasaki vd. (2013), küresel ölçekte yer altı su kaynaklarının iklim değişikliğine karşı kırılganlığını analiz ederek, özellikle yenilenebilir yer altı suyu rezervlerinin iklimsel değişkenliklerden ciddi biçimde etkileneceğini ortaya koymuştur. Çalışmada, farklı Paylaşılan Sosyoekonomik Yollar (SSP) senaryoları altında su kıtlığına ilişkin kapsamlı değerlendirmeler yapılmış ve su arz-talep dengesinin gelecekte daha da hassas hale geleceği vurgulanmıştır. Araştırma, iklim değişikliği ile su mevcudiyeti arasındaki

karmaşık ilişkinin daha sürdürülebilir su yönetimi politikaları gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

Harmsen vd. (2009), Porto Riko'daki üç bölgeyi kapsayan araştırmalarında, iklim değişikliğinin yağış, referans bitki su tüketimi ve ürün verimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Küresel senaryolar (A1, A2, B1) doğrultusunda indirgenen sıcaklık ve yağış verileriyle yapılan analizlerde, Penman-Monteith yöntemi kullanılarak referans bitki su tüketimi hesaplanmıştır. Toprak nemine dayalı su stres faktörü ile nispi verim azalışı belirlenmiş ve tüm senaryolarda verim kayıplarının %6 ila %12 arasında olacağı öngörülmüştür. Çalışmada, yağışlı sezonlarda su depolamanın kurak dönemlerde artan su talebini karşılamak açısından kritik olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, gelecekte hem yağış rejimlerinde değişim hem de kuraklık düzeylerinde artış beklendiği belirtilmiştir.

Islam ve Gan (2015), Kanada'daki Güney Saskatchewan Nehir Havzası'nda iklim değişikliğinin sulama suyu talebine etkilerini incelemişlerdir. A1F1, A21 ve B21 senaryoları; dört farklı küresel iklim modeliyle çalıştırılarak 2010–2039, 2040–2069 ve 2070–2099 dönemleri için projeksiyonlar oluşturulmuştur. Sulama talepleri IDM modeli ile 12 sulama bölgesi ve 4 özel alan için değerlendirilmiştir. Bulgulara göre, ortalama sulama ihtiyacı sırasıyla %7–11, %12–17 ve %13–18 oranlarında artış gösterecektir. Artan sıcaklıkların bu artışta temel belirleyici olduğu vurgulanmıştır.

Islam vd. (2018), Bangladeş'te dört farklı iklim bölgesinde iklim değişikliğinin çeltik üretimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada A1B senaryosu, üç farklı küresel iklim modelinde çalıştırılmış; 1984–2013 gözlem verileri temel alınarak LARS-WG indirgeme modeli ile 2011–2099 dönemi için bölgesel iklim veri setleri oluşturulmuştur. Analiz sonuçları, dört bölgenin tamamında bitki su tüketiminin artacağını göstermektedir. Özellikle sıcaklık değerlerindeki ortalama 0.24–0.62 °C'lik artışın, çeltik bitkisinin su ihtiyacında belirgin bir artışa yol açacağı öngörülmüştür. Çalışmanın bulguları, iklim değişikliğinin bitkisel üretim ve sulama kaynakları üzerindeki baskılarını azaltmak adına, iklim temelli planlama süreçlerinin hayati rol oynadığını göstermektedir.

Kara vd. (2021), Gediz Nehri Havzası'nda gerçekleştirdikleri araştırmada, uzun süreli kuraklıkların su kaynakları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan analizlerde, özellikle şiddetli ve kalıcı kuraklık dönemlerinde yüzey suyu miktarının ciddi biçimde azaldığı ve bu durumun havzada yürütülen tarımsal faaliyetler üzerinde doğrudan olumsuz etkiler yarattığı belirlenmiştir. Araştırma, iklim değişikliğine bağlı su rejimi değişimlerinin tarımsal üretimi ve su yönetimi planlamasını nasıl etkileyebileceğini göstermesi açısından önemli bulgular sunmaktadır.

Köle vd. (2013), iklim değişikliğinin Sakarya Nehir Havzası sınırları içinde kalan Ankara ili su kaynakları üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada, küresel iklim verilerinin bölgesel ölçekte anlamlandırılması amacıyla bölgesel iklim modelleri kullanılmış; Max-Planck Meteoroloji Enstitüsü tarafından geliştirilen küresel modelden elde edilen A2 ve B2 senaryolarına ait sıcaklık ve yağış verileri indirgenerek yıllık ortalama değerler hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, 100 yıllık bir projeksiyon süreci kapsamında, Ankara'nın da içinde bulunduğu havzada sıcaklık artışı ve yağıştaki azalışın yüzey su kaynaklarının beslenmesini olumsuz yönde etkileyeceğini göstermektedir. Bu çalışma, bölgesel su yönetimi planlamasında iklim projeksiyonlarının dikkate alınmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Lhomme vd. (2009), Tunus'ta iklim değişikliğinin durum buğdayı üretimi üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirdikleri çalışmalarında, SRES A1B senaryosunu kullanarak ARPEGE küresel dolaşım modeli altında projeksiyonlar geliştirmişlerdir. Tunus'u temsil etmesi amacıyla seçilen Jendouba ve Kairouan bölgelerinde yapılan simülasyonlarda, sıcaklık değerlerinde sistematik bir artış gözlemlenirken, yağış miktarlarında bölgesel ve mevsimsel farklılıklar tespit edilmiştir. Jendouba'da yıllık ortalama yağış azalmış, buna karşılık Kairouan'da artış göstermiştir. Bu durum, bitki su açığının Jendouba'da daha da artmasına, Kairouan'da ise hafif bir azalma göstermesine neden olmuştur. Çalışma, iklim değişiminin bölgesel su dengesi ve ürün verimi üzerindeki etkilerinin tarım politikaları açısından dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Masia vd. (2018), İtalya'daki altı farklı sulama bölgesi ve bu bölgelere bağlı su toplama havzalarında iklim değişikliğinin sulama suyu ihtiyacı, rezervuarlardan buharlaşma miktarları ve tatlı suya erişim üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada 1976–2005 dönemine ait iklim verileri kullanılarak, RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları doğrultusunda 2036–2045 yıllarına ilişkin projeksiyonlar yapılmıştır. Sulama suyu ihtiyacı, SIMETAWR bitki su tüketimi modeli ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, incelenen bölgelerde düşen yağış miktarlarına bağlı olarak rezervuarların yeterince dolmayacağı, bu durumun da sulama suyu temininde açık oluşturacağı yönündedir. Bu kapsamda, iklim değişikliğinin su yönetimi ve tarımsal üretim üzerindeki etkilerinin belirgin şekilde hissedileceği vurgulanmıştır.

Matiu vd. (2017), iklim değişikliğinin sıcaklık artışı ve kuraklıkla ilişkili etkilerini birlikte ele alarak, bu iki unsurun tarımsal üretim üzerindeki birleşik etkilerini ortaya koymuştur. Araştırmada, sıcaklık artışlarının kuraklıkla etkileşiminin tarımsal stresleri daha da şiddetlendirdiği ve bu durumun özellikle verim üzerinde olumsuz sonuçlar doğurduğu ifade edilmiştir. Çalışma, bu bağlamda iklim değişkenliğiyle başa çıkabilmek adına kuraklığa dayanıklı bitki türlerinin geliştirilmesi ve yaygınlaştırılmasının tarımsal uyum stratejilerinde merkezi bir rol oynayacağına dikkat çekmektedir.

Meza vd. (2008), İstanbul'un Şile ilçesinde gerçekleştirilen saha çalışmasında, iklim değişikliğine bağlı olarak artan sıcaklıkların mısır bitkisinin verimi üzerindeki olası etkileri değerlendirilmiştir. IPCC'nin A1F1 ve B2B senaryoları doğrultusunda yapılan analizlerde, farklı hibrit mısır türlerinde verimin %10 ila %30 arasında azalacağı öngörülmüştür. Çalışma, iklim değişikliğinin tarımsal üretim üzerindeki olumsuz etkilerine dikkat çekmekte ve bölgesel adaptasyon stratejilerinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

Mirgol vd. (2020), İran'ın yarı kurak iklim koşullarına sahip Quazvin Platosu'nda gerçekleştirdikleri araştırmada, iklim değişikliğinin buğday, arpa ve silajlık mısırın sulama gereksinimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada CanESM2 bölgesel indirgeme modeli ve IPCC'nin önerdiği RCP 2.6, RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları kapsamında 2016–2040, 2041–2065 ve 2066–2090 yıllarını kapsayan dönemler için iklim

verileri oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, kışlık buğday ve arpanın sulama gereksiniminde %38 ile %79 arasında artış öngörülürken, silajlık mısır için bu artış %0.7 ile %4.1 arasında kalmıştır. Bu bulgular, kurak iklim bölgelerinde tarımsal su yönetiminin iklim değişikliğine bağlı olarak yeniden ele alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Mizyed (2018), iklim değişikliğinin Filistin'deki yeraltı su kaynakları üzerine etkilerini inceleyerek, özellikle akiferlerin doğal yollarla beslenme süreçlerini değerlendirmiştir. Araştırma bulgularına göre, Akdeniz Bölgesi'nde yüzyıl sonuna kadar sıcaklıklarda 2–2.7 °C'lik bir artış beklenmekte, yağışlarda ise %3 ile %10 arasında azalma tahmin edilmektedir. Bu değişimlerin, özellikle aylık yağış dağılımı ve bitki su tüketimi verileri kullanılarak oluşturulan hidrolojik model ile akifer geri beslemesine olan etkileri analiz edilmiştir. Bulgular, sıcaklık artışının akiferlerin geri beslemesini %6–13 oranında azaltabileceğini, yağışlardaki %3–10'luk azalışın ise bu oranı %3–25'e kadar çıkarabileceğini göstermiştir. Sonuçlar, yeraltı su kaynaklarının özellikle kurak bölgelerde iklim değişikliğinden daha fazla etkileneceğini ve bu nedenle sürdürülebilir yeraltı su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesinin zorunlu olduğunu vurgulamaktadır.

Porter vd. (2019), iklim değişikliği ile tarımsal üretim arasındaki etkileşimi kapsamlı biçimde ele alarak, bu ilişkinin bölgesel farklılıklara göre değişen dinamiklerini incelemiştir. Araştırma, iklim değişikliğinin tarımsal sistemler üzerindeki etkilerinin coğrafi, sosyoekonomik ve ekolojik koşullara göre büyük ölçüde farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, geliştirilecek uyum stratejilerinin yerel özellikleri dikkate alınması gerektiği vurgulanmış; tarımsal politikaların bölgeye özgü çözümler üretmesi gerektiği ifade edilmiştir.

Rajabi vd. (2022), iklim değişikliğinin 2051 yılına kadar sulama suyu taleplerine etkisini incelemiştir. Çalışmada, iki küçük lizimetre aracılığıyla referans bitki suyu kullanımı ölçülmüş olup, GFDL-ESM2M ve HadGEM2-ES iklim modelleriyle RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları kapsamında buğday, arpa, kolza, mısır, yonca, patates ve soğan gibi yaygın tarım ürünlerinin sulama gereksinimleri öngörülmüştür. Bulgular, her iki senaryoda da tüm bitkilerin su ihtiyacının artacağını göstermiştir. Tüketim eğilimleri stabil kaldığında, GFDL-ESM2M modeline göre RCP 4.5 senaryosu altında yıllık su

talebinin 369.66 milyon m³'e, RCP 8.5 senaryosunda ise 375.58 milyon m³'e ulaşması beklenmektedir. HadGEM2-ES modelinde ise söz konusu değerler sırasıyla 345.11 ve 349.85 milyon m³ olarak tahmin edilmektedir.

Srivastava vd. (2018), Merkez Gana'da iklim değişikliğinin mısır verimi üzerindeki etkilerini değerlendirmiş ve farklı iklim senaryoları altında en kısıtlayıcı iklim parametrelerini analiz etmişlerdir. Çalışmada RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları kullanılarak GFDL-ESM2M, GISS-E2-H ve HadGEM2-ES küresel iklim modelleriyle üç farklı zaman dilimi için simülasyonlar yapılmıştır. Elde edilen bulgular, tüm senaryolarda ve dönemlerde ortalama mısır veriminin arttığını göstermektedir. Bu artış, özellikle atmosferdeki CO₂ yoğunluğunun bitkinin radyasyon kullanım etkinliğini artırmasıyla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca bölgede mısırın yetiştirme dönemlerinde su kısıtı yaşanmaması nedeniyle su kaynaklarındaki genel azalışın verim üzerinde sınırlayıcı bir etkisi olmadığı ifade edilmiştir.

Sun vd. (2018), Çin'in Kuzey Shaanxi bölgesinde yer alan Loess Platosu'nda gerçekleştirdikleri çalışmalarında, iklim değişikliğinin tarımsal sulama ihtiyacı üzerindeki etkilerini üç farklı senaryo (RCP 2.6, RCP 4.5 ve RCP 8.5) kapsamında analiz etmişlerdir. Araştırmada CanESM2 küresel iklim modeli kullanılarak elde edilen veriler, geri beslemeli yapay sinir ağları modeliyle bölgesel düzeye uyarlanmıştır. Modelin eğitim verisi olarak 1961–2000 dönemi, test verisi olarak ise 2001–2005 dönemi kullanılmıştır. Yapılan projeksiyonlar sonucunda 2040 yılına kadar sulama suyu ihtiyacında belirgin artışlar yaşanacağı öngörülmüştür. Bu durum, iklim değişikliğinin tarımsal su yönetimi açısından bölgesel planlamalarda dikkate alınması gereken temel bir unsur olduğunu göstermektedir.

Şen (2009), Çukurova Yöresi'nde 2071–2100 dönemi için iklim değişkenlerini tahmin etmek ve bu değişkenlerin birinci ve ikinci ürün mısır verimine etkilerini belirlemek amacıyla bölgesel iklim modeli RegCM'yi kullanmıştır. Model çıktıları, iklim değişikliğinin mısır verimi üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratacağını ortaya koymuştur. Yapılan varsayımlar, iklim koşullarındaki değişimlerin birinci ürün mısırda %58, ikinci ürün mısırda ise %43,4 düzeyinde verim düşüşüne yol açabileceğini göstermektedir. Bu

sonuçlar, bölge tarımı açısından iklim değişikliğine karşı adaptasyon stratejilerinin geliştirilmesinin önemine işaret etmektedir.

Topcu vd. (2012), iklim değişikliğinin kuraklık koşulları ve tarımsal verimlilik üzerindeki etkilerini projekte ederek, özellikle hassas bölgelerde meydana gelen ciddi kuraklık olaylarının önemli ürün kayıplarına yol açabileceğini göstermektedir

Thomas (2008), iklim değişikliğinin kuru alanlarda sıcaklık artışının yanı sıra yağışların azalması ve düzensizleşmesi yoluyla su kıtlığını derinleştireceğini, en çok kırsal yoksulların etkileneceğini vurgulamaktadır. Çözüm için ürün deseninde değişiklik, daha verimli sulama ve su hasadı teknolojileri, kuraklığa dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi ve mera alanlarının daha etkin yönetimi öne çıkmaktadır. Yazar ayrıca, teknolojik yaklaşımların yanı sıra uyum kapasitesini artıracak kurumsal ve politik düzenlemelerin de ekosistemlerin dayanıklılığı açısından kritik olduğunu ifade etmektedir.

Uak vd. (2010), 1996–2006 yılları arasında Türkiye'nin önemli mısır üretim merkezlerinden biri olan Çukurova Bölgesi'nde iklimsel koşulların mısır tarımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Araştırma süresince toplanan veriler, mısır veriminde gözlemlenen bazı yıllardaki azalmaların, yüksek sıcaklıklarla birlikte değişken nem oranlarının (çok düşük ya da çok yüksek) etkisinden ileri geldiğini göstermektedir. Araştırma, mısırın yetiştirme döneminde ortalama sıcaklık ve nispi nem ile verim arasında anlamlı polinomsal ilişkiler olduğunu ortaya koymuştur. Bitkinin gelişim ve verimliliği açısından kritik olan bu iklimsel parametrelerin, optimum sınırların dışına çıkması durumunda danelerin tam dolmaması ve koanların yeterli büyüklüğe ulaşamaması gibi sorunların ortaya çıktığı ve bu durumun verim kayıplarına yol açtığı saptanmıştır.

Vano vd. (2010), Amerika Birleşik Devletleri'nde yer alan Yakima Nehir Havzası'nda iklim değişikliğinin sulu tarım ve su yönetimi üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, 2080 yılına kadar üç dönem (2020, 2040 ve 2080) için IPCC'nin A1B ve B1 emisyon senaryoları temel alınarak su kısıntıları değerlendirilmiştir. Analizler, A1B senaryosunda su kısıntısı oranlarının sırasıyla 2020'de %27, 2040'ta %33 ve 2080'de %68'e ulaşacağını; B1 senaryosunda ise bu oranların 2020'de %24, 2040'ta %31 ve

2080'de %43 olacağını öngörmüştür. Ayrıca, tarımsal üretimde meydana gelebilecek verim kayıplarının bölge ekonomisi üzerinde %5 ila %16 arasında değişen ekonomik kayıplara neden olabileceği ifade edilmiştir. Çalışma, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetiminin gelecekteki iklim koşullarına bağlı olarak daha da kritik hale geleceğini ortaya koymaktadır.

Wei vd. (2009), Çin'de iklim değişikliğinin gelecekteki tahıl üretimi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Araştırmada, SRES A2 ve B2 senaryoları PRECIS bölgesel iklim modeli kullanılarak değerlendirilmiş ve iklim değişiminin özellikle su kaynakları üzerindeki olumsuz etkilerine odaklanılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre, 2040 yılı itibarıyla toplam tahıl üretiminin A2 senaryosunda %18, B2 senaryosunda ise %9 oranında azalacağı öngörülmektedir. Bu çalışma, su kıtlığının iklim değişikliği ile birlikte tahıl üretimi açısından ciddi bir tehdit oluşturduğunu vurgulamaktadır.

2.5 Uyum, Politika ve Sosyo-Ekonomik Yaklaşımlar

Aall ve Groven (2022), iklim değişikliğiyle mücadelede yerel yönetimlerin rolünü ele alarak, bu düzeydeki aktörlerin iklim belirsizliklerine karşı daha esnek ve yansıtıcı bir yaklaşım benimsemeleri gerektiğini savunmaktadır. Yazarlar, özellikle yerel ölçekte iklim etkilerinin analiz edilmesi ve bu etkilere yönelik müdahale kapasitesinin güçlendirilmesinin, etkili iklim politikalarının uygulanabilirliği açısından kritik olduğunu vurgulamaktadır. Genel olarak literatürdeki bulgular, iklim değişikliğinin çok boyutlu zorluklar doğurduğunu ve bu nedenle farklı sektör ve yönetim düzeylerinde kapsamlı, entegre politika yaklaşımlarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Bu bağlamda kamu algısının doğru analiz edilmesi, yerel yönetimlerin kurumsal kapasitesinin artırılması ve toplumsal katılımın teşvik edilmesi, iklim değişikliğine uyum ve etkilerinin azaltılması süreçlerinde temel stratejik unsurlar olarak öne çıkmaktadır.

Barak (2020), Türkiye'deki ortaokul müfredatlarında yer alan iklim değişikliği ile ilgili konuları inceleyerek, öğrenci farkındalığını artırmak adına bu konuların daha sistematik ve bütüncül bir biçimde müfredata entegre edilmesi gerektiğini savunmuştur. Bu yaklaşım, Yörük ve Akpınar'ın (2023) üniversite düzeyindeki iklim eğitimiyle ilgili

bulgularıyla da paralellik göstermektedir. Onlar, yükseköğretim kurumlarının, iklim krizine karşı öğrencilerin duyarlılığını artıracak somut projeler üretmesi gerektiğini vurgulamıştır. Öte yandan, Aydın ve Genç (2023) ise iklim değişikliğinin Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları üzerindeki tehditlerini ele alarak, bu hedeflere ulaşmada hızlı ve etkili politikaların geliştirilmesinin zorunlu olduğuna dikkat çekmektedir. Bu çalışmalar, iklim değişikliği ile mücadelede eğitim ve politikaların birlikte ele alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Cologna vd. (2024), aşırı hava olaylarının halkın iklim politikalarına desteği üzerindeki etkisini küresel ölçekte ele alarak, çevresel risk algısının kamuoyu davranışları üzerindeki belirleyici rolüne dikkat çekmiştir. Araştırmanın bulguları, iklim kaynaklı olayların doğrudan deneyimlenmesinin, iklim politikalarına olan toplumsal desteği önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Öte yandan Xepapadeas ve Economides (2018), iklim değişikliği ile ekonomik politika araçları arasındaki etkileşimi analiz etmiş ve özellikle para politikalarının çevresel sürdürülebilirlik hedefleriyle bütünleştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Bu iki çalışma, etkili iklim yönetişiminin yalnızca çevresel değil, aynı zamanda sosyo-ekonomik dinamiklerle birlikte ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Güray ve Akgün (2024), iklim değişikliğinin özellikle kadınlar ve çocuklar üzerindeki sağlık etkilerini ele aldıkları çalışmalarında, bu grupların iklim kaynaklı sağlık risklerine karşı daha savunmasız olduklarını ve bu nedenle hedefe yönelik sosyal ve sağlık temelli müdahalelere acilen ihtiyaç duyulduğunu belirtmektedirler. Bu çerçevede geliştirilecek politikaların, yalnızca çevresel değil aynı zamanda toplumsal eşitsizlikleri de dikkate alması gerektiği vurgulanmaktadır.

Grecksch (2018), İngiltere ve Galler’de uygulanan mevcut kuraklık ve su kıtlığı yönetim stratejilerini inceleyerek, bu uygulamaların etkinliğini ve karşılaşılan zorlukları değerlendirmiştir. Çalışma, kurumsal kapasite, paydaş katılımı ve esnek politika yapım süreçlerinin, su yönetimi stratejilerinin başarısı üzerindeki belirleyici etkisine dikkat çekmektedir. Çalışmanın ortaya koyduğu çıktılar, su kaynakları açısından benzer sorunlarla karşı karşıya olan ülkeler için, özellikle Türkiye gibi iklim değişikliğinin

etkilerini yoğun biçimde hisseden bölgelerde, entegre ve katılımcı su yönetimi yaklaşımlarının geliştirilmesine dair önemli ipuçları sunmaktadır.

Korkmaz (2023), tarafından Mersin ilinde gerçekleştirilen çalışmada, bireylerin iklim değişikliğine ilişkin kaygı düzeylerini etkileyen faktörler analiz edilmiştir. Çalışmada sosyo-demografik değişkenlerin (yaş, cinsiyet, eğitim düzeyi vb.), bireylerin iklim değişikliği ve etkilerine yönelik algılarını anlamlı düzeyde şekillendirdiği saptanmıştır. Bu sonuçlar, çevresel risk algısının sosyal yapıyla yakından ilişkili olduğunu ve politikaların hedef gruplara göre uyarlanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Mendelsohn (2009), iklim değişikliğinin en belirgin ekonomik etkisinin tarım sektöründe ortaya çıkacağını vurgulamaktadır. Tarımın iklim koşullarına doğrudan bağımlılığı nedeniyle, bu sektördeki üretim miktarı ve verim, iklimsel değişkenlikten büyük ölçüde etkilenmektedir. Çalışmada, özellikle gelişmekte olan ülkelerde ve düşük rakımlı bölgelerde faaliyet gösteren çiftçilerin, artan sıcaklıklar nedeniyle daha fazla zarar göreceği belirtilmiştir. Bu durum, iklim değişikliğinin yalnızca çevresel değil, aynı zamanda sosyal ve ekonomik eşitsizlikleri derinleştiren bir risk unsuru olduğunu da ortaya koymaktadır.

Mwalukasa (2013), iklim değişikliğine karşı kırılgan olan tarım topluluklarının uyum kapasitesinin artırılmasında bilgiye erişimin kritik bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Çalışmada, çiftçilerin sürdürülebilir tarım uygulamalarına yönelmeleri ve değişen iklim koşullarına karşı daha dirençli hale gelmeleri için tarımsal bilgi ve danışmanlık hizmetlerinin yaygınlaştırılması gerektiği vurgulanmaktadır. Bilgi paylaşımının artırılması, yalnızca bireysel üreticilerin değil, aynı zamanda kırsal toplulukların genel dayanıklılığının da geliştirilmesine katkı sağlamaktadır.

Ogunbode vd. (2020), bireylerin iklim değişikliğine yönelik inanç ve endişelerinin, yaşadıkları yerel çevresel olaylarla nasıl şekillendiğini incelemişlerdir. Araştırma, halkın iklim değişikliği konusundaki duyarlılığının, bizzat deneyimlenen doğal afetlerle birlikte belirgin şekilde yükseldiğini göstermiştir. Öte yandan Hisali ve arkadaşları (2011), Uganda'da yürüttükleri çalışma ile, kırılgan bölgelerde yaşayan hane halklarının iklim

değişikliğine karşı uyum sağlayabilmeleri için sürdürülebilir stratejilere olan ihtiyacı vurgulamışlardır. Çalışma, tarıma dayalı geçim kaynaklarının iklimsel şoklara karşı oldukça duyarlı olduğunu ve bu durumun toplumsal kırılganlığı artırdığını ortaya koymaktadır.

Terdo ve Adekola (2014), gerçekleştirdikleri çalışmalarında iklim dostu tarım yöntemlerinin, kırsal bölgelerde iklim değişikliğine karşı direnci artırma ve sürdürülebilir üretim yapısını destekleme açısından önemli fırsatlar sunduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada, iklim dostu tarımın sadece emisyonları azaltma yönünde değil, aynı zamanda çiftçilerin değişen iklim koşullarına uyum sağlama kapasitelerini güçlendirme açısından da etkili bir araç olduğu ifade edilmektedir. Bu kapsamda, çevre dostu üretim tekniklerinin yaygınlaştırılması ve yerel kalkınma politikalarına entegre edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır.

Wright vd. (2014), kırsal toplulukların iklim değişikliğine karşı kırılganlığını azaltmak için tarım politikalarının topluluk temelli uyum stratejileriyle bütünleştirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Araştırmalarına göre, iklimle bağlantılı afetler kırsal haneleri orantısız biçimde etkilemekte, bu nedenle yerel bilgi ve katılımın ön planda olduğu uygulamaların desteklenmesi önem arz etmektedir. Gans (2012) tarafından ortaya konan görüşe göre, etkili iklim politikaları çevresel faydaların ötesinde ekonomik fırsatlar da yaratma potansiyeline sahiptir. Bu doğrultuda, çevreye yönelik düzenlemelerin yenilikçiliği teşvik ederek yeni teknolojilerin gelişmesini destekleyebileceği ve uzun vadede sürdürülebilir kalkınmaya katkı sunabileceği vurgulanmaktadır.

2.6 HEC-HMS, GIS ve Hidrolojik Modelleme Çalışmaları

Kuraklık analizlerinde iklim projeksiyonlarının yanı sıra hidrolojik modelleme yaklaşımları da yaygın şekilde kullanılmaktadır. Fiziksel tabanlı hidrolojik modelleme araçları olan HEC-HMS ve HEC-GeoHMS, havza bazında yağış-akış ilişkilerinin sayısal olarak analiz edilmesi ve bölgesel su bütçesinin hesaplanmasında etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu modeller, özellikle karmaşık hidrolojik süreçlerin anlaşılmasında ve su kaynaklarının planlanmasında önemli kolaylıklar sağlamaktadır (USACE 2021). Bu

modeller, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) destekli yapıları sayesinde, özellikle bölgesel kuraklık risklerinin belirlenmesi ve yönetilmesi açısından stratejik bir araç olarak değerlendirilmektedir (Feldman 2001). Kuraklıkla mücadelede alınacak önlemlerin başarıya ulaşabilmesi için, bu tür modelleme çalışmalarının güvenilir verilerle desteklenmesi ve senaryo-temelli yaklaşımlarla zenginleştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Abbasa vd. (2016), Irak'ın Al-Adhaim bölgesinde gerçekleştirdikleri çalışmada, iklim değişikliğinin bölgedeki su kaynaklarına olası etkilerini değerlendirmek amacıyla SWAT (Soil and Water Assessment Tool) hidrolojik modelini kullanmıştır. Araştırma bulguları, bölgedeki hidrolojik sistemlerin iklimsel faktörlere karşı kırılğan yapıda olduğunu ortaya koyarken, sıcaklık artışları ve yağış rejimindeki düzensizliklerin akım hacminde ciddi değişimlere neden olabileceğini de vurgulamaktadır. Bu bulgular, su yönetimi politikalarının iklim değişkenliklerini dikkate alacak şekilde yeniden yapılandırılması gerektiğine işaret etmektedir.

Abiri vd. (2013), HEC-HMS kapsamında uygulanan SCS ve Green-Ampt yöntemlerini analiz ederek, modelin çeşitli hidrolojik durumlara ne şekilde uyarlanabileceğine dair önemli çıkarımlar sunmuştur. Bu analiz, modelin esnek yapısının farklı iklimsel ve topoğrafik koşullara göre optimize edilebileceğini göstermektedir.

Ahi vd. (2022), Karaidemir Barajı'nda buharlaşmayı yapay sinir ağları ile modelleyerek iklim değişikliği senaryolarına göre projeksiyonlar geliştirmiştir. HadGEM2-ES ve MPI-ESM-MR iklim modelleri kapsamında RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları kullanılmış, farklı algoritmalarla test edilen modellerin yüksek doğruluk sağladığı görülmüştür. Uzun dönem sonuçlar, buharlaşmada senaryolara bağlı olarak artış veya azalış eğilimlerinin ortaya çıkabileceğini göstermektedir.

Âmin vd. (2018), Pakistan'ın Güney Punjab bölgesinde son yıllarda tarımsal üretim açısından tehdit oluşturan iklimsel düzensizlikleri incelemişlerdir. Araştırmada, 1980–2011 yılları arasındaki gözlemsel sıcaklık ve yağış verileri temel alınarak, 2025 ve 2050 yılları için geleceğe yönelik iklim projeksiyonları oluşturulmuştur. Araştırmada, iklim

projeksiyonlarını değerlendirmek üzere 40 farklı genel sirkülasyon modeli çalıştırılmış ve bu modeller, RCP4.5, RCP6.0 ile RCP8.5 senaryoları kapsamında test edilmiştir. Elde edilen iklim projeksiyonları, SimCLIM bölgesel indirgeme modeli aracılığıyla yerel düzeye uyarlanmıştır. Modelleme sonuçları, çalışılan tüm senaryolarda gelecek dönemlerde minimum ve maksimum sıcaklıkların artacağına, buna karşın yağış miktarlarında azalma yaşanacağına işaret etmektedir. Bu durum, özellikle tarım sektörü açısından iklim değişikliğine karşı uyum stratejilerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Baldwin (2017), iklim değişikliğinin göç hareketleri üzerindeki etkilerini insan hakları ve insani yardım perspektifinden değerlendirmiştir. Çalışma, çevresel stres faktörlerinin zorunlu göçü tetikleyebileceğini ve bu durumun yalnızca bir çevre meselesi değil, aynı zamanda bir sosyal adalet ve insan güvenliği meselesi olarak ele alınması gerektiğini savunmaktadır. Öte yandan Urwin ve Jordan (2008), çok düzeyli yönetim bağlamında iklim değişikliğine uyum politikalarını incelemiş ve politika yapımında dikey ve yatay koordinasyon eksikliklerinin, uyum süreçlerini zayıflattığını belirtmişlerdir. Bu nedenle, etkili bir iklim politikası için ölçekler arası uyumlu ve bütüncül stratejilerin geliştirilmesinin gerekliliği vurgulanmaktadır.

Demir vd. (2013), bilgi teknolojilerindeki gelişmelerin iklim modellemesine etkisini ele aldıkları çalışmalarında, özellikle 1970’li yıllardan itibaren bilgisayar destekli modelleme kapasitesinin önemli ölçüde arttığını belirtmişlerdir. İlk nesil modellerin yalnızca atmosferik verileri temel aldığına dikkat çeken araştırmacılar, günümüzde kara yüzeyi, okyanuslar, buzullar, karbon döngüsü ve bitki örtüsü gibi çok sayıda ekosistem bileşeninin modellere entegre edildiğini vurgulamaktadır. Çalışmada ayrıca, bu bilimsel ilerlemenin kurumsal anlamda IPCC'nin kuruluşuyla küresel ölçekte yapılandığı ifade edilmektedir. IPCC'nin yayımladığı değerlendirme raporlarının, politika üretim süreçlerinde bilimsel rehberlik sağlama işlevi üstlendiği belirtilmiştir.

Diriba (2023), Etiyopya’daki Gelana Havzası’nda gerçekleştirdiği çalışmada ArcGIS ve HEC-HMS modellerini bir arada kullanarak yağış-akış ilişkisini detaylı biçimde incelemiştir. Araştırmada, HEC-GeoHMS aracılığıyla dijital yükselti modeli (DEM)

verilerinden hidrolojik yapıların başarıyla türetilebildiği gösterilmiş ve bu yöntemin havza ölçekli modellemelerde etkin bir araç olduğu vurgulanmıştır.

Ennasr vd. (2016), Fas'ın güneybatısında yer alan Ait Baha Havzası'nda iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, geleceğe yönelik iklim projeksiyonları IPCC'nin RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında iki ayrı dönem (2030–2049 ve 2080–2099) için değerlendirilmiştir. Küresel iklim projeksiyonları, CORDEX bölgesel modelleme sistemiyle alt ölçeğe indirgenmiş, ardından bu veriler HEC-HMS hidrolojik modeline entegre edilerek analiz edilmiştir. Model sonuçlarına göre, RCP4.5 senaryosu altında sıcaklık artışının ilk dönemde yaklaşık 2 °C, ikinci dönemde ise 4–5 °C düzeyinde olacağı öngörülmektedir. Aynı dönemlerde yağış miktarlarında sırasıyla %10–30 ve %60 oranlarında azalma beklenmektedir. Hidrolojik modelleme sonuçları, bu değişikliklerin yer altı suyu beslenmesinde ve baraj seviyelerinde ciddi düşümlere yol açacağını, 2050 yılı itibarıyla su talebinin arzı yaklaşık üç kat aşacağı kritik bir açık yaratacağını ortaya koymuştur. Elde edilen çıktılar, iklim değişikliğine havza bazlı olarak uyum politikalarının yapılandırılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Gürkan vd. (2016), Marmara Bölgesi'nde iklim değişikliğinin ayçiçeği verimi üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. HadGEM2-ES küresel iklim modeli ve RCP 8.5 senaryosu ile elde edilen projeksiyon verileri kullanılarak yapılan analizlerde, sıcaklık ve nemdeki değişimlerin ayçiçeği verimi üzerinde yüksek derecede etkili olduğu tespit edilmiştir. Marmara Bölgesi'nde 10 ili kapsayan çalışmada, iklim faktörleri ile verim arasında güçlü bir korelasyon olduğu belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, Edirne ilinin iklim değişikliğine karşı görece daha az risk altında olduğunu, Tekirdağ'ın ise daha büyük olumsuzluklarla karşı karşıya kalabileceğini göstermektedir. Sürdürülebilir üretimin devamlılığı açısından, bölgesel koşullara uygun tarımsal önlemlerin alınması ve iklim değişikliğine yönelik uyum stratejilerinin uygulanması büyük önem taşımaktadır.

Gürkan vd. (2017), tarafından yürütülen çalışmada, Konya, Tekirdağ, Edirne, Kırklareli ve Adana illerinde ayçiçeği verimliliğine yönelik projeksiyonlar, iklim modellemeleri aracılığıyla oluşturulmuştur. Çalışmanın ilk aşamasında, SPSS programında yapay sinir

ağları yöntemiyle iklim parametrelerine dayalı verim değişimleri analiz edilmiştir. İkinci aşamada ise HadGEM2-ES küresel iklim modeli ve RCP 4.5 senaryosu kullanılarak gelecek yüzyıla yönelik verim tahminleri yapılmıştır. Analizler sonucunda, Tekirdağ dışındaki tüm illerde ayçiçeği veriminde artış öngörülmüştür. İklim verileriyle verim arasında en yüksek korelasyonun Konya ilinde gözlemlendiği belirtilmiştir. Bu çalışma, bölgesel tarımsal planlamada iklim modellerinin etkin kullanımına yönelik önemli bir örnek sunmaktadır.

Gürler vd. (2024), Susurluk Havzası için hidrolojik kuraklık risk modelleri geliştirmiştir. Çalışmada uzun dönemli akım gözlemleri düşük akım indislerine (Q_7 , Q_{15} , Q_{30} , Q_{60}) dönüştürülmüş, bölgeselleştirme analizleri sonucunda havza iki homojen alt bölgeye ayrılmıştır. Elde edilen modeller, alçak alanlarda sıradan regresyonun, dağlık alanlarda ise temel bileşen regresyonunun daha uygun olduğunu göstermiştir. Susurluk Havzası özelinde ilk kez gerçekleştirilen bu araştırma, tarımsal su yönetimi ve su tahsisi planlamaları için önemli sonuçlar sunmaktadır.

Hamdan vd. (2021), Al-Adhaim Nehir Havzası özelinde HEC-HMS aracılığıyla yağış-akış mekanizmasını detaylandırarak hidrolojik süreçlerin simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Çalışmada, HEC-GeoHMS'nin dijital yükselti modelleri (DEM) aracılığıyla drenaj yollarını belirleme ve bu verileri hidrolojik modelleme için gerekli veri yapılarına dönüştürme konusundaki işlevi vurgulanmıştır. Bu yaklaşımın özellikle veri eksikliği yaşanan bölgelerde hidrolojik modelleme açısından etkili sonuçlar sunduğu belirtilmiştir.

Ishak vd. (2016) ise HEC-GeoHMS aracı kullanarak farklı Dijital Yükseklik Modeli (DEM) kaynaklarının akarsu ağlarının belirlenmesindeki etkisini analiz etmiştir. Farklı eşiğe sahip akarsu ağları üzerinden yapılan karşılaştırmalar sonucunda, bu modelleme yönteminin hidrolojik simülasyonlar açısından tutarlı ve uygulanabilir sonuçlar sunduğu gösterilmiştir.

Liu ve Mizzi (2020), iklim değişikliği ile arazi kullanımındaki değişimlerin su kaynakları üzerindeki karmaşık etkilerini analiz etmek amacıyla hibrit bir SWAT (Soil and Water

Assessment Tool) modeli uygulamışlardır. Çalışma, su kaynaklarının uzun vadeli sürdürülebilirliği açısından, arazi kullanım senaryoları ile iklim değişikliği öngörülerinin birlikte ele alınmasının zorunluluğuna dikkat çekmektedir.

Loon ve Laaha (2015), hidrolojik kuraklıkların şiddetini belirleyen temel faktörleri analiz ederek, iklimsel değişkenler ile havza karakteristikleri arasındaki etkileşimlere odaklanmışlardır. Çalışmada, kuraklığın bölgesel su döngüsü üzerindeki etkilerinin doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için iklim koşulları ve fiziki havza yapısının birlikte ele alınmasının zorunluluğu vurgulanmaktadır. Elde edilen bulgular, kuraklık riski değerlendirmelerinde daha kapsamlı ve çok değişkenli modelleme yaklaşımlarının kullanılmasının gerekliliğine işaret etmektedir.

Maan vd. (2020), HEC-HMS modelinden yararlanılarak, taşkın riskini tahmin etmeye yönelik olarak hidro-informatik yaklaşımlarla desteklenen yeni bir analiz yöntemi ortaya konulmuştur. Araştırmada, modelin özellikle taşkın risk analizlerinde etkili sonuçlar sunduğu ve karar destek sistemlerinin oluşturulmasında değerli bir araç olduğu vurgulanmıştır. Bu kapsamda, modelin karmaşık hidrolojik süreçleri simüle etme kapasitesi, afet yönetimi ve erken uyarı sistemlerinin güçlendirilmesine yönelik uygulamalarda öne çıkarılmıştır.

Muleta ve Marcell (2023), farklı iklim değişikliği senaryoları kapsamında yağış-akış süreçlerini HEC-HMS modeli aracılığıyla simüle ederek, iklimin hidrolojik döngü üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmiştir. Çalışma, özellikle artan sıcaklıklar ve değişen yağış rejimlerinin yüzey akışlarını nasıl dönüştürebileceğini ortaya koymakta ve hidrolojik modellemenin, iklim değişikliğine bağlı su kaynakları yönetiminde temel bir araç olduğunu vurgulamaktadır.

Rizal vd. (2023) ise, havza bazlı hidrolojik tepkilerin tahmininde kullanılan eğri sayısı yöntemine odaklanmış ve bu yöntemin HEC-GeoHMS aracılığıyla kalibre edilmesinin, model çıktılarının doğruluğunu artırmada etkili olduğunu göstermiştir. Çalışma, model kalibrasyonunun özellikle hassas havzalarda doğru akış tahmini açısından önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Rodriguez-Diaz vd. (2007), İspanya'nın güneyinde yer alan Guadalquivir Nehir Havzası'nda yürüttükleri çalışmada, iklim değişikliğinin tarımsal sulama üzerindeki olası etkilerini analiz etmişlerdir. Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS) destekli agro-klimatik veriler kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde, 2050 yılına kadar bölgedeki mevsimsel sulama suyu talebinde %15 ila %20 arasında bir artış beklendiği ortaya konmuştur. Bu durum, artan sıcaklıklar ve azalan yağışlar gibi iklimsel streslerin sulama gereksinimlerini daha da artıracağına işaret etmektedir. Çalışma aynı zamanda, kuraklık koşullarının tarımsal üretim sistemlerini nasıl daha kırılgan hale getirdiğini vurgulamakta ve iklim değişikliğine uyum sağlamanın gerekliliğini ortaya koymaktadır. Özellikle su kaynaklarının sürdürülebilir kullanımı ve sulama sistemlerinin modernizasyonu, iklim değişikliğinin olumsuz etkilerini azaltmak açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, sulama stratejilerinin iklim projeksiyonlarına dayalı olarak yeniden değerlendirilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

Sampath vd. (2015), Sri Lanka'daki Deduru Oya Nehir Havzası'nda HEC-HMS modelini kullanarak yüzey akışlarını simüle etmiş ve bu modelin bölgedeki su kaynaklarının yönetimi açısından güvenilir bir araç olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada, modelin güvenilirliğinin artırılmasında hidrolojik parametrelerin kalibrasyonunun kritik rol oynadığı vurgulanmış ve bu yaklaşım, benzer uygulamalara temel teşkil edebilecek nitelikte yöntemsel bir katkı olarak sunulmuştur.

Silva vd. (2007), Sri Lanka için 2050 yılına yönelik iklim projeksiyonları oluşturarak, gelecekteki sulama suyu gereksinimlerini incelemişlerdir. Çalışmada, HadCM3 küresel iklim modeli ve IPCC'nin tanımladığı SRES senaryoları kullanılarak geleceğe dönük iklim verileri elde edilmiştir. Özellikle yağışlı sezonlar için su dengesi modeli ile birlikte Coğrafi Bilgi Sistemleri (GIS) kullanılarak, sulama ihtiyacındaki değişimler hem mekânsal hem de zamansal boyutta analiz edilmiştir. Araştırma, iklim değişikliğinin bölgesel düzeyde su kaynakları planlaması üzerinde önemli etkiler yaratacağını göstermektedir. Artan sıcaklıklar ve yağış düzenindeki istikrarsızlıklar, tarımsal faaliyetlerde sulama gereksinimini önemli ölçüde artırmakta; bu durum, mevcut su kaynaklarının daha etkin ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesini zorunlu hale getirmektedir (Fererres and Soriano 2007). Bu bağlamda çalışma, Sri Lanka gibi tropikal

bölgelerde iklim değişikliğine uyum sağlamak adına sulama altyapısının güçlendirilmesi ve ileriye dönük senaryo temelli planlamaların yapılması gerektiğine işaret etmektedir.

Tekkanat ve Sarış (2015), Porsuk Çayı Havzası'nda 1970-2011 yılları arasındaki uzun dönemli akım verilerini analiz ederek, bölgedeki akarsu rejiminde belirgin bir azalma eğilimi olduğunu ortaya koymuştur. Ortalama, maksimum ve minimum akımların önemli bir bölümünde istatistiksel olarak anlamlı düşüşler gözlenmiş ve bu durum artan sıcaklıklar, azalan yağışlar ve buharlaşmadaki artışlarla ilişkilendirilmiştir. Bulgular, iklim değişikliğinin hidrolojik denge üzerindeki etkilerini göstermesi açısından önemlidir.

Thakur vd. (2017), HEC-RAS ve HEC-HMS modellerini entegre ederek yağış-akış modellemesi gerçekleştirmiş ve hidrolojik-hidrolik modellerin taşkın yönetimi açısından entegrasyonunun önemini vurgulamıştır.

Theofanous ve Myronidis (2020), ölçüm istasyonu bulunmayan akarsu havzalarında taşkın hidrograflarının tahmini için HEC-GeoHMS ile HEC-HMS modellerinin entegrasyonunu kullanarak bir analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmada, modelleme çıktılarının taşkın risklerinin değerlendirilmesinde ve sürdürülebilir altyapı planlamasında karar vericilere önemli katkılar sunduğu belirtilmiştir. Bu yaklaşım, özellikle veri eksikliği bulunan bölgelerde hidrolojik değerlendirme yapılmasına olanak tanımaktadır.

Öztürk vd. (2014), Türkiye'nin gelecekteki iklim koşullarını tahmin etmek amacıyla, 1970–2000 yılları arasındaki tarihsel iklim verilerini referans alarak 2070–2100 dönemi için bir dizi iklim simülasyonu gerçekleştirmiştir. Çalışmada, uluslararası düzeyde yaygın olarak kullanılan ICTP'ye ait RegCM4.3.5 bölgesel iklim modeli ile Met Office Hadley Merkezi tarafından geliştirilen HadGEM2 küresel iklim modeli birlikte kullanılmıştır. Alt ölçekli iklim senaryolarına dayalı analizler, Türkiye ve çevresinde için RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları kapsamında sıcaklık değerlerinde 3 ila 7 °C arasında artış yaşanabileceğini ortaya koymaktadır. Buna ek olarak, günlük ortalama yağış miktarının 0,8 mm/gün ile 1.2 mm/gün aralığında yükselmesi olasıdır. Çalışma, Türkiye'nin iklim

sisteminde meydana gelebilecek uzun dönemli değişimlerin bölgesel düzeyde analiz edilmesine olanak tanımaktadır.

Özdemir (2021), Yuvacık Barajı Havzası'nda RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları kapsamında gerçekleştirdiği modelleme çalışmasında, akış ve sediment süreçlerinde ortaya çıkabilecek değişimlerin, bölgedeki hidrolojik döngü üzerinde ciddi yapısal etkiler oluşturabileceğini vurgulamaktadır.

Uysal vd. (2024), Fırat Nehri Havzası'nda HEC-HMS ve HBV modellerini kullanarak 2025–2100 dönemi için hidrolojik projeksiyonlar gerçekleştirmiştir. İklim senaryolarına dayalı olarak yapılan bu çalışma, eriyen kar örtüsünün ve değişen yüzey akışlarının gelecekteki su dengesine etkisini incelemiş ve adaptif su yönetim politikaları önerilmiştir.

Yang vd. (2017), Portekiz'de mısır üretiminin gelecekte iklim değişikliğinden nasıl etkileneceğini ortaya koymak amacıyla kapsamlı bir modelleme çalışması gerçekleştirmiştir. Akdeniz havzasında sıcaklık artışları ve kurak koşulların yoğunlaşacağı öngörüsüne dayanan araştırmada, mısır bitkisinin gelişim süreci, verim potansiyeli ve su tüketiminde yaşanabilecek değişimler farklı iklim senaryoları altında incelenmiştir. Bu amaçla MPI-ESM-LR küresel iklim modeli ile SMHI-RCA4 bölgesel iklim modeli kullanılmış; RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları doğrultusunda 2021–2040, 2041–2060 ve 2061–2080 dönemlerine ilişkin projeksiyonlar değerlendirilmiştir. Bulgular, özellikle yüksek emisyon senaryosu altında uzun vadede mısır veriminde belirgin düşüşlerin yaşanabileceğini ve su talebindeki artışın üretim üzerindeki baskıyı artıracakđını göstermektedir. Çalışma, bu koşullar altında sürdürülebilir üretim için sulama stratejilerinin yeniden ele alınması gerektiğine dikkat çekmektedir.

Yano vd. (2007), Türkiye'nin Akdeniz Bölgesi'nde uygulanan buğday–mısır münavebe sisteminde, iklim değişikliğinin bitki gelişimi ve sulama suyu ihtiyacı üzerindeki potansiyel etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada 1990–2100 dönemi için üç farklı genel dolaşım modeli (CGCM2, ECHAM4 ve MRI) kullanılarak A2 emisyon senaryosu temel alınmış ve bu kapsamda geleceğe yönelik iklim değişkenleri üretilmiştir. Analiz sonuçları, tüm iklim modellerinde bölgedeki yağış miktarlarında azalma, sıcaklıklarda ise

artış beklendiğini ortaya koymuştur. Yükselen sıcaklık değerlerinin, bitkisel üretim süreçlerinde buharlaşma ve terleme (evapotranspirasyon) düzeylerini artırarak, tarımsal sulama ihtiyacında belirgin bir artışa neden olacağı çeşitli araştırmalarda vurgulanmaktadır. Bu durum, mevcut su kaynakları üzerinde baskı oluşturacağı gibi, iklim değişikliğine uyum sağlama konusunda tarımsal su yönetiminin yeniden yapılandırılmasını zorunlu kılmaktadır. Çalışma, Akdeniz iklimine sahip bölgelerde sıcaklık artışı ve yağış azalışının birlikte değerlendirilerek, uzun vadeli tarımsal planlamalarda dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Yıldırım vd. (2016), haşhaş üretiminin iklim değişikliğinden nasıl etkileneceğini değerlendirdikleri çalışmalarında, HadGEM2-ES iklim modeli ile RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryolarını kullanarak 2015–2040, 2040–2070 ve 2070–2099 dönemlerine ait sıcaklık ve yağış projeksiyonlarını oluşturmuşlardır. Analizler, özellikle 2070–2099 döneminde batı bölgelerdeki illerde – Balıkesir, Manisa, Uşak ve Denizli – haşhaş üretim alanlarında daralma olacağını ortaya koymuştur. Bu azalışın, artan sıcaklıklar ve azalan yağış miktarlarına bağlı olarak haşhaşın uygun ekolojik yaşam alanlarının daralmasından kaynaklanacağı öngörülmektedir. Çalışma, haşhaş gibi iklim hassasiyeti yüksek bitkilerde iklim senaryolarına dayalı üretim planlamasının gerekliliğini vurgulamaktadır.

Zeleeuw ve Melesse (2018), yarı dağılımlı modellerin yüzey akışı öngörüsündeki güvenilirliğini HEC-HMS yardımıyla analiz ederek havza temelli uygulamalarda ne derece etkili olduklarını ortaya koymuştur. Araştırma, modelin farklı coğrafi koşullarda güvenilir sonuçlar verdiğini ve su yönetimi uygulamalarında geniş bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

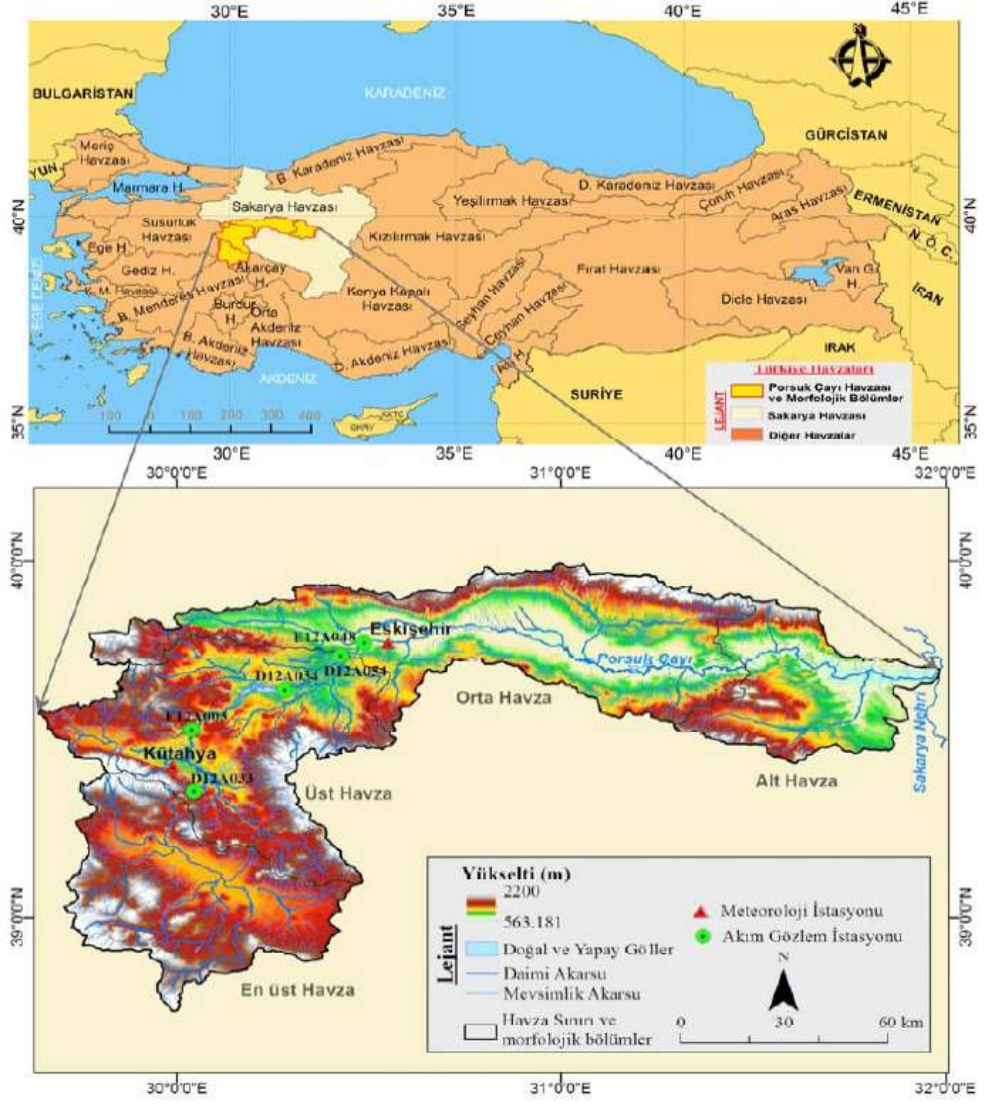
3.1.1 Araştırma alanı

Porsuk havzası, Sakarya Nehir Havzasının bir alt havzası olup kuzeybatı Anadolu'da yer almaktadır. Havza, 29° 38'-31° 59' doğu boylamları ile 38° 44'-39° 99' kuzey enlemleri arasında yer almaktadır. Havza, doğu-batı ekseninde yaklaşık 202 kilometre, kuzey-güney doğrultusunda ise yaklaşık 135 kilometre uzunluğa sahiptir (Anonim 2017b).

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi Porsuk havzasında, Eskişehir ve Kütahya il merkezleri ile birlikte, Afyonkarahisar, Bilecik, Ankara ve Uşak illerine bağlı toplam 16 ilçe merkezi, 22 belediye ve 345 köy bulunmaktadır (Anonim 2022).

Havzanın %60'ından fazlası dağlıktır. Porsuk havzasının yüzey suları, Porsuk Çayı ve yan kolları tarafından toplanır ve havza içinde 435.8 km yol kat ettikten sonra, Sazlılar mevkiinde, 660 m kotunda, Sakarya nehrine dökülür (Bakış vd. 2009).

Bu çalışma, Porsuk Havzası'nda iklim değişikliği senaryoları altında meydana gelebilecek olası hidrolojik ve meteorolojik kuraklıkların belirlenmesi ve değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Çalışma alanı olarak seçilen Porsuk Havzası, Sakarya Nehri'nin önemli alt havzalarından biri olup İç Anadolu Bölgesi'nde yer almaktadır.



Şekil 3.1 Araştırma Alanı, Porsuk Havzası coğrafi konum haritası

3.1.2 İklim özellikleri

Porsuk havzası, İç Batı Anadolu Bölgesinde, Ege ve Marmara Bölgesi'nin geçiş ikliminden, İç Anadolu Bölgesinin karasal iklimine geçit teşkil ettiği bir bölgededir. Kışları sert, uzun ve yağışlı, yazları ise sıcak ve kurak geçer. Porsuk havzasının yağış alanı Ege, Marmara ve İç Anadolu bölgeleri arasında oluşan bir geçiş bölgesindedir.

Porsuk Barajı yağış alanında, Orta Anadolu kara iklimine kıyasla biraz daha fazla yağış gerçekleşmekte olup bu yağışlar özellikle kış ve ilkbahar aylarında yoğunlaşmaktadır. Kar yağışı Kasım-Nisan ayları arasında olmaktadır.

Porsuk Havzası, yağış özellikleri açısından bir geçiş bölgesinde yer almakta olup bu konumun etkisi yağış rejiminde de açıkça görülmektedir. Bölgede çoğunlukla İç Anadolu Bölgesi'nin karakteristik yağış rejimi etkilidir. Yıllık ortalama yağış miktarı yaklaşık 470 mm'dir. En yüksek yıllık ortalama yağış 603 mm, en düşük ise yaklaşık 283 mm olarak kaydedilmiştir. Uzun dönemli verilere göre, aylık bazda en kurak aylar sırasıyla Ağustos (13.6 mm), Temmuz (16.5 mm) ve Eylül (17.5 mm) olarak gözlenmiştir.

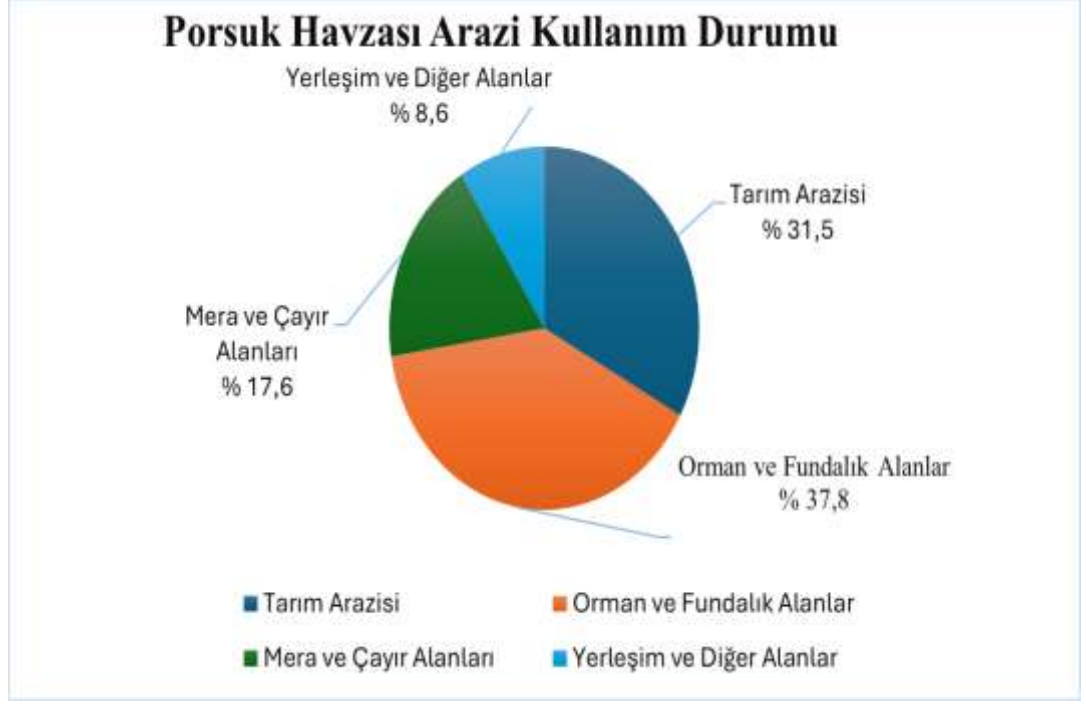
3.1.3 Arazi varlığı, toprak ve topoğrafya özellikleri

Porsuk Alt Havzası, Sakarya Havzası'nın bir alt havzası olup, 11 325 km²'lik (1 132 500 hektar) bir yüzey alanına sahiptir (Anonim 2019). Havza genelinde arazi kullanım dağılımı; tarım alanları, orman ve fundalıklar, mera ve çayır alanları ile yerleşim ve diğer kullanım alanlarından oluşmaktadır (Çizelge 3.1).

Çizelge 3.1 Arazi kullanım dağılımı (Porsuk Alt Havzası)

Arazi Kullanım Türü	Alan (hektar)	Yüzde (%)
Tarım Arazisi	357 000	31.5
Orman ve Fundalık Alanlar	428 000	37.8
Mera ve Çayır Alanları	200 000	17.6
Yerleşim ve Diğer Alanlar	97 500	8.6
Toplam	1 132 500	100.0

Çizelge 3.1 incelendiğinde, Porsuk Havzası'nda görülen temel arazi kullanım türlerini ve bunların havza içindeki oranlarını özetlemektedir. Tablo, tarım alanları ile orman ve mera gibi doğal örtülerin dağılımını karşılaştırmalı olarak göstererek çalışma alanının genel arazi yapısına ilişkin net bir çerçeve sunmaktadır. Yerleşim ve diğer alanlar ise toplam alanın %8.6'sını oluşturmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Porsuk Alt Havzası kurumlara göre arazi varlığı dağılımı (Anonim 2019)

Topografya açısından Porsuk Alt Havzası, genellikle orta eğimli ve dağlık bir yapıya sahiptir. Havzanın %60'ından fazlası dağlık alanlardan oluşmaktadır. Rakım 660 m ile 1800 m arasında değişmekte olup ortalama rakım 950 m'dir (Anonim 2019).

Porsuk Alt Havzası'nda toprakların sınıflandırılması, arazinin tarımsal verimlilik potansiyeli ve kullanıma uygunluğu açısından önemlidir. Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü (KHGM) verilerine göre, havzadaki toprak sınıflarının dağılımı aşağıdaki gibidir:

Çizelge 3.2 Porsuk Havzası toprak kullanım sınıfları dağılımı (Anonim 2017b)

Toprak Kullanım Sınıfı	Alan (hektar)	Yüzde (%)
I. Sınıf (Verimli tarım arazileri)	73 615	6.8
II. Sınıf (Orta derecede verimli tarım arazileri)	151 416	13.9
III. Sınıf (Eğimli ve taşlı tarım alanları)	111 264	10.3
IV. Sınıf (Sınırlı tarım yapılabilen alanlar)	116 477	10.7
V-VIII. Sınıf (Tarım dışı için uygun, orman ve mera alanları)	679 728	59.9
Toplam	1 132 500	100.0

Çizelge 3.2'deki sınıflandırma, Porsuk Havzası'nda yer alan toprak gruplarının tarımsal kullanıma uygunluk bakımından nasıl dağıldığını göstermektedir. Havzada hem verimlilik açısından elverişli sınıflar hem de eğim, derinlik veya taşlılık gibi nedenlerle daha sınırlı kullanım potansiyeline sahip alanlar bulunmaktadır. Bu çeşitlilik, havzanın farklı bölümlerinde toprakların su tutma kapasitesi, işlenebilirlik ve arazi kullanım biçimini doğrudan etkileyen heterojen bir yapı oluşturduğunu ortaya koymaktadır.

Porsuk Havzası'nda bitki örtüsü iklim ve yükseklik farklılıklarına bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Düşük rakımlı alanlarda step ve bozkır bitki örtüsü hâkimken, yüksek kesimlerde meşe, karaçam, sarıçam ve göknar ağaçlarından oluşan ormanlar yaygındır. Tarım alanlarında başlıca ürünler arasında arpa, buğday, çavdar gibi tahıllar ile ayçiçeği ve çeşitli meyve bahçeleri bulunmaktadır.

3.1.4 Su kaynakları ve sulamaya açılan alanları

Porsuk Havzası, su kaynakları açısından önemli bir bölgedir. Havzanın yıllık su potansiyeli 481 hm³/yıl yerüstü ve 297 hm³/yıl yeraltı suyu olmak üzere toplam 778 hm³/yıl'dır. Porsuk Havzasında sulamaya açılan ve açılacak alanlarla ilgili bilgiler Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Porsuk Havzasındaki sulama alanlarının durumu (Anonim, 2017b)

Sulamalar	Sulama Alanı (ha)
Mevcut (DSİ + KHGM)	43 293
Halk Sulamaları (yerüstü + sondaj)	16 160
YAS Sulamaları (DSİ Sulama Kooperatifi)	17 687
YAS Sulamaları (Belgeli Şahıs Kuyuları)	5 845
İnşaat Halindeki Sulamalar	3 873
Mutasavver Sulamalar	19 915
Toplam	106 773

Çizelge 3.3’de görüldüğü gibi Porsuk Havzası’nda mevcut, planlanan ve yapım aşamasındaki sulama sistemlerinin toplam sulama alanı 106 773 hektar olarak belirlenmiştir. Bu alanlar, farklı kurumlar ve yöntemler tarafından yönetilen sulama sistemleri üzerinden dağıtılmaktadır. En büyük pay 43 293 ha ile DSİ (Devlet Su İşleri) ve KHGM (Mülga Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü) tarafından sağlanan mevcut sulama sistemlerine aittir. Bu miktar, toplam sulamanın yaklaşık %41’ine karşılık gelmektedir.

Halk tarafından gerçekleştirilen sulamalar (yüzey suyu ve sondaj temelli), 16 160 ha’lık bir alanı kapsamaktadır. YAS (Yatırımcıların Arazi Sulamaları) kapsamında ise, DSİ destekli kooperatifler aracılığıyla yapılan sulamalar 17 687 ha, belgeli şahıs kuyuları ile yapılan bireysel sulamalar ise 5 845 ha olarak kaydedilmiştir. Böylece YAS sistemi altında sulanan toplam alan 23 532 ha’ya ulaşmaktadır.

Henüz tamamlanmamış olan ve yapım aşamasında bulunan sulama projeleri 3.873 ha’lık alanı kapsamaktadır. Ayrıca, projelendirme aşamasında olan ve gelecek yıllarda devreye alınması beklenen mutasavver (tasarlanan) sulama sistemleri, 19 915 ha gibi önemli bir potansiyeli temsil etmektedir (Anonim 2019).

Bu veriler ışığında Porsuk Havzası’ndaki sulama altyapısının hem mevcut durumunun hem de gelecekteki genişleme potansiyelinin oldukça önemli olduğu söylenebilir. Sulama çeşitliliği, özellikle kuraklık ve iklim değişikliği bağlamında havzanın tarımsal üretim güvenliği açısından stratejik değer taşımaktadır.

Porsuk Havzası'nın başlıca su kaynağını Porsuk Çayı oluşturmakta olup havzada bulunan çeşitli yan dereler ve kaynaklar da su temini açısından önemli katkılar sağlamaktadır. Tarım ve içme suyu ihtiyaçlarının karşılanmasında Porsuk Barajı ile Kunduzlar Barajı gibi büyük su depolama tesisleri kritik bir öneme sahiptir. Ayrıca, Porsuk Çayı'nın yanı sıra Felent Çayı ve Karakaya Deresi, havzadaki başlıca akarsular arasında yer almaktadır.

Porsuk Havzası'nda, su kaynaklarının etkin kullanımı amacıyla baraj, gölet, elektro pompaj ve yeraltı suyu gibi çeşitli sulama tesisleri inşa edilmiştir. Bu tesisler ve sulamaya açılan alanlar aşağıdaki Çizelge 3.4'de sunulmuştur.

Çizelge 3.4 Porsuk Havzasındaki sulama tesisleri ve alanlar (Anonim 2024b)

Sulama Tesisi	Sulamaya Açılan Alan (ha)
Kunduzlar Barajı	5 000
Çatören Barajı	3 500
Yenice Göleti	1 200
İncesu Barajı	800
İnönü Sulaması	1 850
Eskişehir (Porsuk) Sulaması	16 600
Aşağı Kuzfindık Sulaması	2 179
Beylikova Sulaması	2 100
Beşkarış Sulaması	6 351
Kureyşler Sulaması	2 460
Toplam	41 040

Sulamaya açılan alanların sulama yöntemlerine göre dağılımı da Çizelge 3.5'de verilmiştir.

Çizelge 3.5 Sulama alanlarının sulama sistemlerine göre dağılımı (Anonim 2024b)

Sulama Yöntemi	(%)
Yüzey Sulama	53.3
Yağmurlama Sulama	26.7
Damla Sulama	20.0
Toplam	100.0

3.1.5 Çalışmada kullanılan veriler

3.1.5.1 Meteorolojik veriler

Bu çalışmada kullanılan meteorolojik veriler, Türkiye genelinde uzun dönemli gözlem serileri sağlayan Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne (MGM) ait istasyonlardan temin edilmiştir. Porsuk Havzası ve yakın çevresini temsil edecek şekilde seçilen istasyonlar için aylık toplam yağış, aylık ortalama sıcaklık ve gerektiği yerlerde maksimum–minimum sıcaklık verileri kullanılmıştır. Analizlerde tutarlılık sağlanması amacıyla, tüm istasyonlar için ortak bir dönem belirlenmiş ve eksik gözlemler içeren yıllar değerlendirme kapsamı dışında bırakılmıştır.

Ham veriler kullanılmadan önce temel kalite kontrol işlemlerinden geçirilmiştir. Bu kapsamda, açıkça hatalı olduğu görülen ekstrem değerler, istasyon kayıtları ve komşu istasyon serileri ile karşılaştırılarak kontrol edilmiş; zamansal sürekliliği bozan anormallikler tespit edilmiştir. Eksik veriler, kuraklık indeks hesaplarını ve model kalibrasyonunu etkilemeyecek şekilde, kabul edilebilir oranların üzerine çıkan yıllar çıkarılarak yönetilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan tüm meteorolojik seriler, hem havzanın genel iklim karakteristiğini yansıtacak hem de kuraklık analizlerinde kullanılacak SPI hesapları için yeterli sürekliliği sağlayacak biçimde düzenlenmiştir.

3.1.5.2 Hidrolojik veriler

Hidrolojik veriler, Porsuk Havzası'ndaki akım rejimini temsil eden Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne (DSİ) bağlı akım gözlem istasyonlarından elde edilmiştir. Havza çıkışına yakın ve drenaj alanı iyi tanımlanmış istasyonlar tercih edilmiş, böylece hem kalibrasyon ve validasyon sürecinde hem de kuraklık analizlerinde kullanılacak güvenilir debi serileri oluşturulmuştur. Çalışmada ağırlıklı olarak aylık ortalama akım değerleri kullanılmış, bazı değerlendirmelerde ise model kurulumu ve performans analizleri için günlük verilerden yararlanılmıştır.

Akım serileri, model girdisi olarak kullanılmadan önce süreklilik, bütünlük ve homojenlik açısından incelenmiştir. Ölçüm hatası içerdiği anlaşılan ya da işletme kaynaklı ani değişimlerin görüldüğü dönemler, istasyon kayıtları ve ilgili teknik raporlar doğrultusunda değerlendirilmiş; ihtiyaç duyulan yerlerde doğal akıma dönüştürülmüş seriler kullanılmıştır. Uzun dönemli hidrolojik gözlemler, hem HEC-HMS modelinin kalibrasyon ve doğrulama adımlarında, hem de Standart Akış İndeksi (SRI) hesaplamalarında temel veri kaynağı olarak değerlendirilmiştir.

3.1.5.3 İklim projeksiyon verileri

Geleceğe yönelik değerlendirmelerde kullanılan iklim projeksiyon verileri, iklim değişikliğinin Porsuk Havzası üzerindeki olası etkilerini incelemek amacıyla, senaryo temelli küresel iklim modellerinden türetilmiş ve bölgesel ölçekte yeniden ölçeklendirilmiş grid verilerden oluşmaktadır. Çalışmada, orta düzey sera gazı artışını temsil eden RCP4.5 ve yüksek emisyon artışını ifade eden RCP8.5 senaryolarına dayalı projeksiyonlar kullanılmıştır. Bu veri setleri, havzayı kapsayan belirli bir mekânsal çözünürlükte (örneğin birkaç on kilometre mertebesinde) düzenlenmiş sıcaklık ve yağış serilerini içermektedir.

Projeksiyon verileri, tarihsel referans dönemindeki gözlemlerle karşılaştırılarak belirli bir tutarlılık kontrolünden geçirilmiş, daha sonra seçilen periyotlar için (örneğin 2024–2050, 2050–2075 ve 2075–2099) ayrı ayrı analiz edilmiştir. Her bir senaryo ve dönem için elde edilen aylık yağış ve sıcaklık ortalamaları, önce Porsuk Havzası ölçeğinde alan ortalaması alınacak şekilde işlenmiş, ardından HEC-HMS modeline girdi oluşturacak formatta düzenlenmiştir. Bu sayede, farklı iklim senaryoları altında havzanın akım rejiminde ve kuraklık karakterinde ortaya çıkabilecek değişimler karşılaştırılabilir hâle getirilmiştir.

3.1.5.4 Kuraklık indekslerinde kullanılan veriler

Kuraklık analizlerinde kullanılan veriler, meteorolojik ve hidrolojik kuraklığın birlikte değerlendirilmesine olanak tanıyacak şekilde yapılandırılmıştır. Meteorolojik kuraklığın incelenmesinde Standart Yağış İndeksi (SPI) kullanılmış, bu amaçla çalışma alanını

temsil eden istasyonların uzun dönemli aylık yağış serilerinden yararlanılmıştır. SPI hesaplarında, farklı kuraklık ölçeklerini yansıtmak üzere 3, 6 ve 12 aylık birikimli yağış değerleri dikkate alınmış; böylece kısa süreli dalgalanmalar ile daha uzun süreli kuraklık eğilimleri ayrı ayrı izlenebilmiştir.

Hidrolojik kuraklığın değerlendirilmesi için ise Standart Akış İndeksi (SRI) tercih edilmiştir. SRI hesaplarında, DSİ'ye ait akım gözlem istasyonlarından elde edilen uzun dönemli aylık debi serileri ile HEC-HMS modelinden üretilen akım projeksiyonları birlikte kullanılmıştır. Öncelikle gözlenen akım serileri üzerinden tarihsel kuraklık olaylarının şiddeti ve süreleri belirlenmiş, daha sonra iklim senaryolarına dayalı projeksiyonlar kullanılarak gelecekteki olası hidrolojik kuraklıkların mekânsal ve zamansal dağılımı ortaya konmuştur. Böylece meteorolojik ve hidrolojik kuraklık göstergeleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve Porsuk Havzası için bütüncül bir kuraklık analizi yapılabilmektedir.

3.1.5.5 İklim değişikliği (HEC-HMS) hidrolojik modelinde kullanılan veriler

Bu çalışmada, Porsuk Havzası'nda iklim değişikliğinin etkileri ve olası kuraklık analizlerini değerlendirebilmek amacıyla çeşitli veri kaynaklarından yararlanılmıştır. Öncelikle;

- Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından sağlanan uzun dönemli sıcaklık ve yağış verileri kullanılmış;
- Akım verileri ise Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü'ne (DSİ) ait akım gözlem istasyonlarından temin edilmiştir.
- Ayrıca, Tarım ve Orman Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü'nün yayımladığı, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerine ilişkin değerlendirme raporları da veri temininde başvuru olan önemli kaynaklar arasında yer almıştır.

Bunlara ek olarak, IPCC'nin Değerlendirme Raporları doğrultusunda oluşturulan iklim projeksiyon senaryoları ile Porsuk Havzası'nda daha önce gerçekleştirilen hidroklimatolojik kuraklık çalışmalarının bulgularından da faydalanılmıştır.

Çalışmada kullanılan iklim projeksiyonları, küresel iklim modellerine dayalı olarak hazırlanan ve gelecekteki sıcaklık ile yağış değişimlerini değerlendirmeye imkân veren RCP4.5 ve RCP8.5 emisyon senaryolarını kapsamaktadır (IPCC 2021).

3.2 Yöntem

3.2.1 Hidrolojik modelleme yaklaşımı

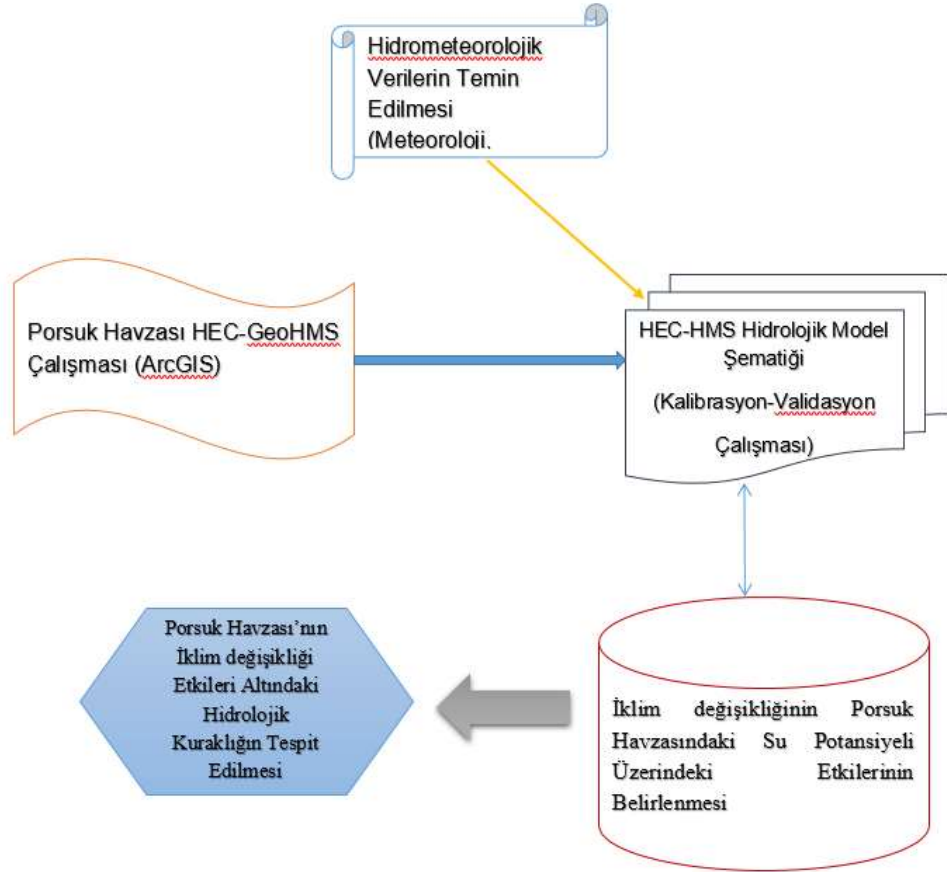
Porsuk Havzası'nda gerçekleştirilen yağış–akış modelleme çalışmasında, hidrolojik süreçlerin nicel olarak temsil edilmesi amacıyla HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) ve HEC-GeoHMS (Geospatial Hydrologic Modeling System) yazılımları birlikte kullanılmıştır. ABD Ordusu Mühendisler Birliği'ne bağlı Hydrologic Engineering Center (USACE–HEC) tarafından geliştirilen bu programlar, havza ölçeğinde hidrolojik analizlerin sistematik biçimde yürütülmesini sağlamaktadır.

HEC-GeoHMS, ArcGIS ortamında çalışan bir Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) tabanlı ön işlem aracıdır. Bu modül, Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) verisini kullanarak drenaj yönleri, akış birikimi, akarsu ağı ve alt havza sınırlarını belirler. Ayrıca arazi kullanımı ve toprak haritalarından yararlanarak SCS Eğri Numarası (Curve Number – CN) gibi hidrolojik parametrelerin mekânsal dağılımını oluşturur. HEC-GeoHMS tarafından üretilen mekânsal veriler, “.met” ve “.basin” uzantılı dosyalar olarak dışa aktarılır ve doğrudan HEC-HMS modeline entegre edilir. Böylece, alt havzalar, drenaj ağı ve bağlantılar HEC-HMS ortamında otomatik olarak tanımlanmış olur.

HEC-HMS modeli ise yağış–akış süreçlerini sayısal olarak simüle eden ana bileşendir. Bu yazılım, çeşitli yöntemlerle yağış kayıplarını (örneğin SCS CN, Green–Ampt), yağış–akış dönüşümünü (örneğin SCS, Clark, Snyder) ve taban akımını (baseflow) hesaplar. Ayrıca akım iletimini (routing) gerçekleştirebilir ve model sonuçlarını gözlemlerle karşılaştırarak performans değerlendirmesi yapar. Modelin doğruluğu genellikle Nash–Sutcliffe Verimlilik Katsayısı (NSE), Belirtme (Determinasyon) Katsayısı (R^2) ve Ortalama Karekök Hatası (RMSE) gibi istatistiksel göstergelerle ölçülmektedir.

Kalibrasyon ve validasyon aşamalarında, model parametreleri gözlem verilerine göre optimize edilerek en uygun senaryo belirlenir.

Şekil 3.3’de görüldüğü gibi, HEC-GeoHMS, hidrolojik modelleme süreci için gerekli mekânsal verilerin hazırlanmasında ve havza topolojisinin oluşturulmasında temel rol oynamaktadır. Bu veriler, HEC-HMS yazılımına aktarılmakta ve model içerisinde hidrolojik süreçlerin zamansal simülasyonu gerçekleştirilmektedir. Her iki yazılımın entegre biçimde kullanılması, Porsuk Havzası gibi karmaşık hidrolojik sistemlerde hem mekânsal hem de zamansal doğruluğu artırarak güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.3 Porsuk Havzası HEC-GeoHMS ve HEC-HMS modelleme iş akışı

3.2.2 Modelin kalibrasyonu ve validasyonu (doğrulaması)

Modelin güvenilirliğini ve doğruluk düzeyini değerlendirmek amacıyla, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) tarafından sağlanan doğallaştırılmış akım verileri kullanılarak kalibrasyon ve doğrulama (validasyon) çalışmaları yürütülmüştür. Kalibrasyon aşamasında, belirli bir zaman dilimine ait gözlem verileri esas alınmış ve model parametreleri, gözlenen akım değerleriyle en yüksek uyumu sağlayacak biçimde sistematik olarak ayarlanmıştır. Bu süreçte özellikle SCS Eğri Numarası (Curve Number), gecikme süresi (Lag Time), gerileme katsayısı (Recession Constant) ve taban akımı (baseflow) parametreleri üzerinde yoğunlaşmıştır.

Kalibrasyon, hem manuel deneme–yanılma yöntemiyle hem de istatistiksel performans göstergeleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Her model çalıştırmasında simüle edilen hidroğraf, gözlenen akım değerleriyle karşılaştırılmış; taşkın pik debileri, pik zamanlaması, düşük akım dönemlerinin eğrisi ve çekilme kolunun formu değerlendirilerek parametreler kademeli biçimde iyileştirilmiştir. Böylece model, Porsuk Havzası'nın hidrolojik davranışını gerçeğe en yakın biçimde temsil edecek yapıya kavuşturulmuştur.

Validasyon (doğrulama) aşamasında ise, kalibrasyonda kullanılan dönemden farklı bir zaman aralığı seçilmiştir. Bu aşamada herhangi bir parametre değişikliği yapılmadan, modelin farklı iklimsel ve hidrolojik koşullar altında da benzer doğruluk düzeyini koruyup korumadığı test edilmiştir. Bu uygulama, modelin yalnızca kalibrasyon dönemine özgü sonuçlar üretmediğini, genel hidrolojik koşullar altında da güvenilir çıktılar verebildiğini göstermiştir.

Model performansının nesnel olarak ölçülmesi amacıyla üç temel istatistiksel kriter kullanılmıştır (Nash ve Sutcliffe 1970; Moriasi et al. 2007).

Belirtme katsayısı (R^2): Belirtme katsayısı, kurulan modelin ne ölçüde geçerli olduğunu ve iki değişken arasındaki ilişkiyi ne kadar iyi açıkladığını belirleyen istatistiksel bir ölçüdür. Korelasyon katsayısının (Eşitlik 4.1) karesi alınarak elde edilen bu değer,

ilişkinin yönünden bağımsız şekilde hesaplanır ve 0 ile 1 arasında değişerek modelin ne ölçüde güvenilir sonuçlar üretebileceğini gösterir.

$$r = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{n \sum X^2 - (\sum X)^2} \sqrt{n \sum Y^2 - (\sum Y)^2}} \quad (4.1)$$

r: korelasyon katsayısı

n: gözlem sayısı

X: Bağımsız değişkenin değerleri

Y: Bağımlı değişkenin değerleri

$\sum XY$: X ve Y değişkenlerinin çarpımlarının toplamı

$\sum X$: X değişkeninin tüm değerlerinin toplamı

$\sum Y$: Y değişkeninin tüm değerlerinin toplamı

$\sum X^2$: X değişkeninin karelerinin toplamı

$\sum Y^2$: Y değişkeninin karelerinin toplamı

\bar{X} : değişkeninin aritmetik ortalaması

\bar{Y} : Y değişkeninin aritmetik ortalaması

Eşitlikte gösterilen denklem korelasyon katsayısı (r)'ni temsil etmektedir. Bunun karesi ise belirtme katsayısını verir.

Ortalama Karekök Hatası (RMSE); Ortalama Karekök Hatası, bağımsız iki denklem arasındaki sonuçların birbirine yakınlığını ya da farklılığını nicel olarak ortaya koyan yaygın bir analiz yöntemidir. RMSE ilişkisi Eşitlik 4.2'de verilmiştir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y'_i)^2} \quad (4.2)$$

RMSE: Root Mean Square Error (Ortalama Karekök Hatası)

n: Gözlem sayısı (toplam veri sayısı)

i: Gözlem sırası (indeks)

y_i : Gerçek (gözlenen) değer

y'_i : Tahmin edilen değer

$y_i - y'_i$: Hata (sapma) değeri

$(y_i - y_i')^2$: Hata değerinin karesi

Eşitlikte yer alan y_i , gözlem değerlerini, y_i' ise model tahmin verilerini tanımlamaktadır.

Nash–Sutcliffe Verimlilik Katsayısı (NSE); Nash–Sutcliffe Verimlilik Katsayısı (NSE), hidrolojik modellerin performansını değerlendirmede en sık kullanılan istatistiksel göstergelerden biridir. Modelin simüle ettiği değerlerin, gözlenen değerlere ne kadar yakın olduğunu ler. NSE katsayısı, 1'e yaklařtıķa modelin gözlemleri daha iyi temsil ettiğini; 0'a veya negatife yaklařtıķa modelin yetersiz kaldığını gösterir.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (4.3)$$

$Q_{obs,i}$: i zaman adımındaki gözlenen akım (m^3/s)

$Q_{sim,i}$: i zaman adımındaki model tarafından simüle edilen akım (m^3/s)

\bar{Q}_{obs} : gözlenen akımların ortalaması

n : gözlem sayısı

Bu çalışmada 2012 yılından sonraki dönem için DSI'den doğallaştırılmış akım verileri temin edilemediğinden, kalibrasyon ve validasyon işlemleri yalnızca mevcut veri seti üzerinden gerçekleştirilmiştir. Buna rağmen yapılan analizler sonucunda, modelin yeterli düzeyde temsil kabiliyetine sahip olduğu ve gözlenen akım değerlerini istatistiksel olarak tatmin edici bir doğrulukta simüle ettiği belirlenmiştir. Elde edilen R^2 , RMSE ve NSE değerleri, modelin hem kalibrasyon hem de validasyon dönemlerinde kabul edilebilir performans sınırları içinde kaldığını göstermektedir.

HEC-HMS modeli Porsuk Havzası'nda yağış–akış süreçlerini başarılı bir biçimde temsil etmiş; elde edilen sonuçlar modelin geleceğe yönelik iklim senaryoları altında da güvenilir şekilde kullanılabileceğini ortaya koymuştur.

3.2.3 İklim senaryoları altında akım projeksiyonlarının elde edilmesi

Bu çalışmada geleceğe yönelik hidrolojik değişimlerin değerlendirilmesi amacıyla, Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından yayımlanan RCP4.5 ve RCP8.5 emisyon senaryoları temel alınmıştır. Bu senaryolar, gelecekteki sera gazı emisyonlarının olası eğilimlerini ve atmosferdeki radyatif zorlama düzeylerini temsil etmekte olup, farklı iklim koşullarında Porsuk Havzası'nın hidrolojik tepkisini inceleme olanağı sunmaktadır.

Modelleme sürecinde kullanılan iklim projeksiyon verileri, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından sağlanmış, her biri 10 x 10 kilometre mekânsal çözünürlüğe sahip ızgara verilerinden oluşmaktadır. Bu veriler, sıcaklık ve yağış parametrelerinin gelecek dönemlerdeki olası değişimlerini içermektedir. İklim projeksiyonlarının seçimi ve kullanımı, hem bölgesel ölçek açısından yeterli ayrıntıyı sağlayacak hem de uzun dönemli eğilimlerin güvenilir biçimde yansıtılmasına olanak tanıyacak şekilde yapılmıştır.

Projeksiyon verileri, HEC-HMS hidrolojik modeline entegre edilmeden önce zamansal ve mekânsal uyumluluk açısından düzenlenmiştir. Bunun için her bir ızgara noktasına ait iklim girdileri, çalışma alanını temsil edecek şekilde ortalama alınmış ve modelin kullandığı zaman adımlarına (günlük veya aylık) dönüştürülmüştür. Böylece model, gelecekte beklenen sıcaklık ve yağış değişimlerini doğrudan kullanabilir hâle getirilmiştir.

Model çalışmaları kapsamında, 2012–2100 yılları arasındaki dönem üç alt zaman dilimine ayrılarak değerlendirilmiştir:

1. Dönem: 2024–2050 (yakın gelecek),
2. Dönem: 2051–2075 (orta dönem),
3. Dönem: 2076–2100 (uzak gelecek).

Her bir dönem için hem RCP4.5 (ılımlı azaltım senaryosu) hem de RCP8.5 (yüksek emisyon senaryosu) altında model çalıştırılmış, elde edilen sonuçlar yağış, yüzey akışı, taban akımı ve toplam debi bileşenleri açısından karşılaştırılmıştır. Böylece, farklı iklim koşullarında havzanın su potansiyelinde ortaya çıkabilecek değişimlerin eğilimleri belirlenmiştir.

Simülasyon sonuçları, gelecekte yağış miktarındaki olası azalmalar ve sıcaklık artışları nedeniyle akım değerlerinde belirgin azalmalar yaşanabileceğini göstermektedir. Bu eğilim, özellikle RCP8.5 senaryosunda daha güçlü biçimde gözlenmiştir. HEC-HMS modeli, bu projeksiyon verilerini kullanarak havzanın su döngüsündeki dinamikleri zamansal olarak simüle etmiş ve akım rejiminde mevsimsel değişimlerin büyüklüğünü nicel olarak ortaya koymuştur.

Sonuç olarak, Porsuk Havzası için yürütülen bu simülasyonlar, iklim değişikliğinin olası etkilerini uzun vadede değerlendirme olanağı sunmakta; özellikle su kaynaklarının planlanması, kuraklık yönetimi ve tarımsal sulama stratejilerinin belirlenmesinde önemli bir bilimsel altyapı sağlamaktadır.

3.2.4 Kuraklık indekslerinin hesaplanması (SRI, SPI)

Kuraklık analizleri hem hidrolojik hem de meteorolojik kuraklık çeşitlerini kapsayacak şekilde yürütülmüştür.

Hidrolojik kuraklık analizi için, akım verilerine dayalı olarak SRI (Standardized Runoff Index, Standart Yüzey Akış İndeksi) kullanılmıştır.

SRI hesaplaması Eşitlik 4.3’de belirtilmiştir.

$$SRI = \frac{x_i - x_j}{\sigma} \quad (4.4)$$

SRI Standardized Runoff Index (Standart Yüzeyakış İndeksi): Belirli bir dönemdeki akım değerinin, uzun dönemli ortalama ve standart sapmaya göre ne kadar sapma gösterdiğini ifade eden standartlaştırılmış bir kuraklık göstergesidir.

x_i : İncelenen döneme (örneğin belirli bir ay veya yıl) ait akım değeri (örneğin m^3/s cinsinden).

x_j : Uzun dönemli ortalama akım değeri (klimatolojik referans ortalaması).

σ (sigma): Uzun dönemli akım değerlerinin standart sapması (yani veri setindeki değerlerin ortalamadan ortalama olarak ne kadar saptığını gösterir).

Standart akım indeksi, Standart Yağış İndeksi (SPI) yöntemine dayalı olarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen bir parametredir. Formülasyonda belirtilen x_i , incelenen dönemdeki mevcut akımı, x_j ise serinin ortalama akımını, σ ise serinin standart sapmasını ifade eder. SRI indeksinin aylık ortalama akım değerleri kullanılır. Direkt akım verisine bağlı olmasından dolayı hidrolojik kuraklığın temel indeksi olarak kabul edilir ve farklı zaman dilimlerinde (1, 3, 6, 9, 12 ve 24 ay) sonuçlar elde edilir (WMO 2016).

Kuraklık risk çalışmasında ise 2024-2100 yılları arasında aylık olarak hesaplanan SRI indeksindeki tüm değerler kendi içerisinde analiz edilerek orta şiddetli kuraklık, şiddetli kuraklık ve çok şiddetli kurak periyot olarak sınıflandırma yapılmıştır.

Sınıflandırmanın oluşturulduğu sınırlar Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6 SRI Kuraklık/Nemlilik Sınıfı

Standart Yüzey Akış İndeksi (SRI) Eşik Değerleri	Kuraklık/Nemlilik Sınıfı
2 ve üzeri	Aşırı nemli
1 - 1.99	Çok nemli
0 - 1	Orta nemli
0 - (-1)	Orta şiddetli kuraklık
(-1) - (-2) arası	Şiddetli kuraklık
(-2) ve altı	Çok şiddetli kuraklık

Meteorolojik kuraklık analizi için, yağış verilerine dayalı SPI (Standardized Precipitation Index, Standart Yağış İndeksi) yöntemi tercih edilmiştir.

$$SPI = \frac{X_i - \bar{X}}{S} \quad (4.5)$$

X_i = İlgili dönemdeki toplam yağış miktarı (örneğin aylık toplam yağış)

\bar{X} = Uzun dönem ortalama yağış

S = Uzun dönem yağışın standart sapması

Elde edilen SRI ve SPI değerleri yardımıyla, geçmiş ve gelecek dönemlerde havza genelinde yaşanabilecek olası kuraklık dönemleri, şiddeti ve sürekliliği belirlenmiştir.

Bu doğrultuda çalışmada, iklim değişikliği kaynaklı kuraklık analizleri için yukarıdaki yaygın indeksler tercih edilmiştir.

Bu indeksler, Porsuk Havzası'nda uzun dönemli kuraklık eğilimlerini belirlemek ve gelecekteki olası kuraklık senaryolarını analiz etmek amacıyla kullanılmıştır.

3.2.5 İklim değişikliği senaryoları ve kuraklık projeksiyonları

Bu çalışmada, Porsuk Havzası'nda iklim değişikliğinin su kaynakları ve tarımsal üretim üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla IPCC'nin RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları kullanılmıştır.

RCP4.5 Senaryosu; Bu senaryoda 2021–2040 arasında 0.5–1 °C, 2041–2070 ve 2071–2099 arasında ise 1.5–2 °C sıcaklık artışı öngörülmektedir. Yağışlarda genel bir azalma beklenmekte ve bu durumun tarımsal su talebini artıracığı ifade edilmektedir (IPCC 2021).

RCP8.5 Senaryosu; Bu senaryoda İlk dönemlerde 1–1.5 °C, 2041 sonrası ise 2–3.5 °C üzeri sıcaklık artışları beklenmektedir. Kuraklık riskinin özellikle yaz aylarında yoğunlaşacağı ve su rezervlerinde azalmalar yaşanabileceği tahmin edilmektedir.

3.2.6 CBS Tabanlı mekânsal analizler ve kuraklık maruziyetinin haritalanması

Bu çalışmada, hidrolojik ve iklimsel verilerin mekânsal olarak bütünleştirilmesi ve analiz edilmesi amacıyla Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) tabanlı bir yaklaşım benimsenmiştir. CBS ortamı, farklı veri türlerini (raster ve vektör formatlar) bir araya getirerek havza düzeyinde çok boyutlu analizlerin yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu kapsamda, Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) başta olmak üzere eğim, yükselti, toprak özellikleri, arazi kullanım sınıfları ve hidrolojik ağ (akım yolları) verileri birlikte değerlendirilmiştir.

Öncelikle, MGM ve DSİ tarafından sağlanan verilerden elde edilen alt temalar ArcGIS ortamına aktarılmıştır. Bu katmanlar üzerinde mekânsal eşleştirme (overlay), yeniden sınıflandırma (reclassification) ve ağırlıklandırılmış çakıştırma (weighted overlay) işlemleri gerçekleştirilmiştir. DEM verisi, havzanın morfometrik özelliklerinin (eğim, akış yönü, akış birikimi) çıkarılmasında temel veri olarak kullanılmıştır. Elde edilen eğim ve yükseklik haritaları, suyun akış yönünü, taşkın alanlarını ve potansiyel kuraklık bölgelerini belirlemede önemli bir girdi oluşturmuştur.

Arazi kullanım ve toprak sınıfları verileri, Corine 2018 ve TÜBİTAK MRC veri tabanlarından elde edilmiştir. Bu veriler sayesinde, su tutma kapasitesi, geçirgenlik ve bitki örtüsü yoğunluğu gibi hidrolojik parametreler mekânsal olarak değerlendirilmiştir. Farklı toprak ve arazi kullanım türlerinin yüzey akışı üzerindeki etkisi SCS Eğri Numarası (Curve Number – CN) yöntemi ile ilişkilendirilmiş; böylece modelin mekânsal doğruluğu güçlendirilmiştir.

Daha sonra, RCP4.5 ve RCP8.5 iklim senaryolarına göre elde edilen yağış ve sıcaklık projeksiyonları, CBS tabanında analiz edilmiştir. Bu analizlerde, her bir senaryonun gelecekteki kuraklık eğilimlerine olan etkisini belirleyebilmek amacıyla Standart Yağış İndeksi (SPI) ve Standart Akım İndeksi (SRI) sonuçları raster formatında yeniden sınıflandırılmıştır. Bu katmanlar, CBS’de zaman serisi analizine tabi tutularak 2012–2100 dönemi boyunca kuraklığın mekânsal dağılımı ve şiddet değişimleri ortaya konmuştur.

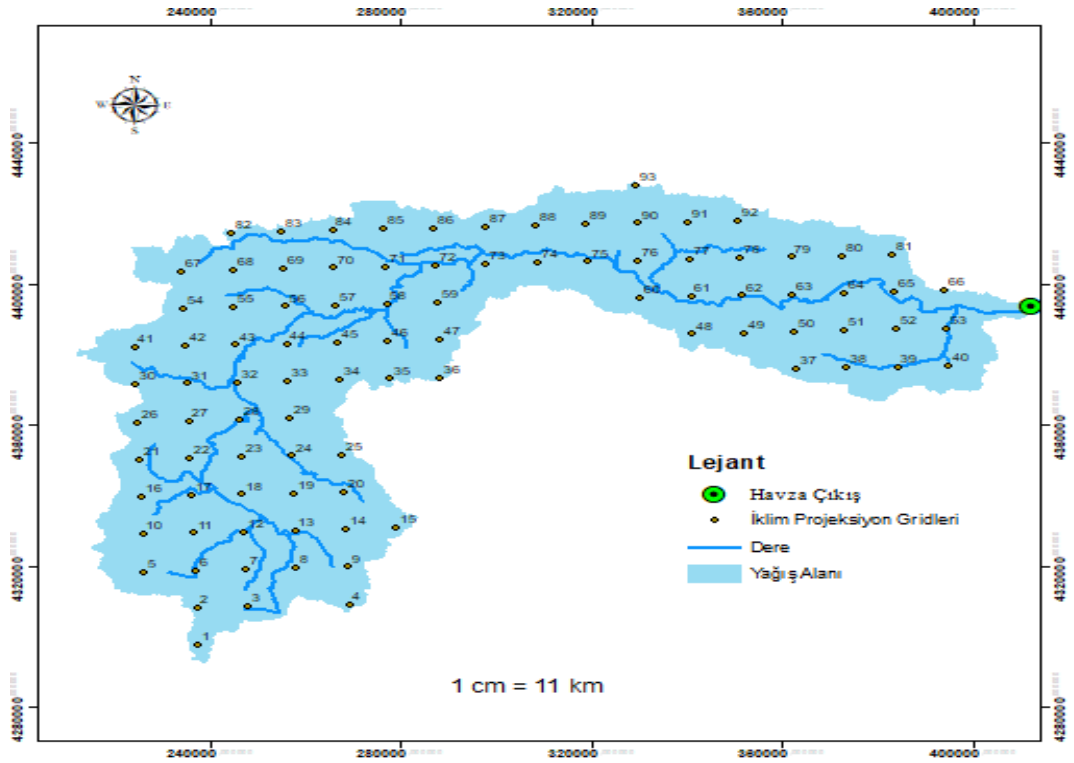
Elde edilen çıktılar doğrultusunda kuraklık risk haritaları oluşturulmuştur. Bu haritalar, havzanın farklı bölgelerinde kuraklık eğiliminin hangi dönemlerde ve ne lde artış gösterebileceğini görsel olarak ortaya koymuştur. Böylece iklim senaryoları altında zamansal (yıllık ve dönemsel) ve mekânsal (bölgesel) lekte kuraklık analizleri yapılabilmifitir.

CBS destekli bu analiz süreci, iklim değişikliğine bağlı su kaynakları yönetimi açısından güçlü bir karar destek aracı işlevi grmuştur. Mekânsal analizlerin yardımıyla Porsuk Havzası'ndaki riskli bölgeler belirlenmiş, kuraklık eğilimleri sayısal verilerle desteklenmiş ve geleceğe yönelik uyum stratejilerinin geliştirilmesine bilimsel bir temel oluşturulmuştur.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1 Porsuk Havzası İklim Projeksiyon Verileri

Havzanın iklim projeksiyon verileri Su Yönetimi Genel müdürlüğü tarafından 10 km × 10 km çözünürlükte temin edilmiştir. Veriler, iyimser ve kötümser senaryo altında küresel iklim modellerinin ortalaması olarak geleceğe yönelik günlük yağış ve sıcaklık verilerini içermektedir. Havza genelinde temin edilen iklim projeksiyon verilerinin grid noktaları Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 Porsuk Havzası iklim projeksiyon grid noktaları

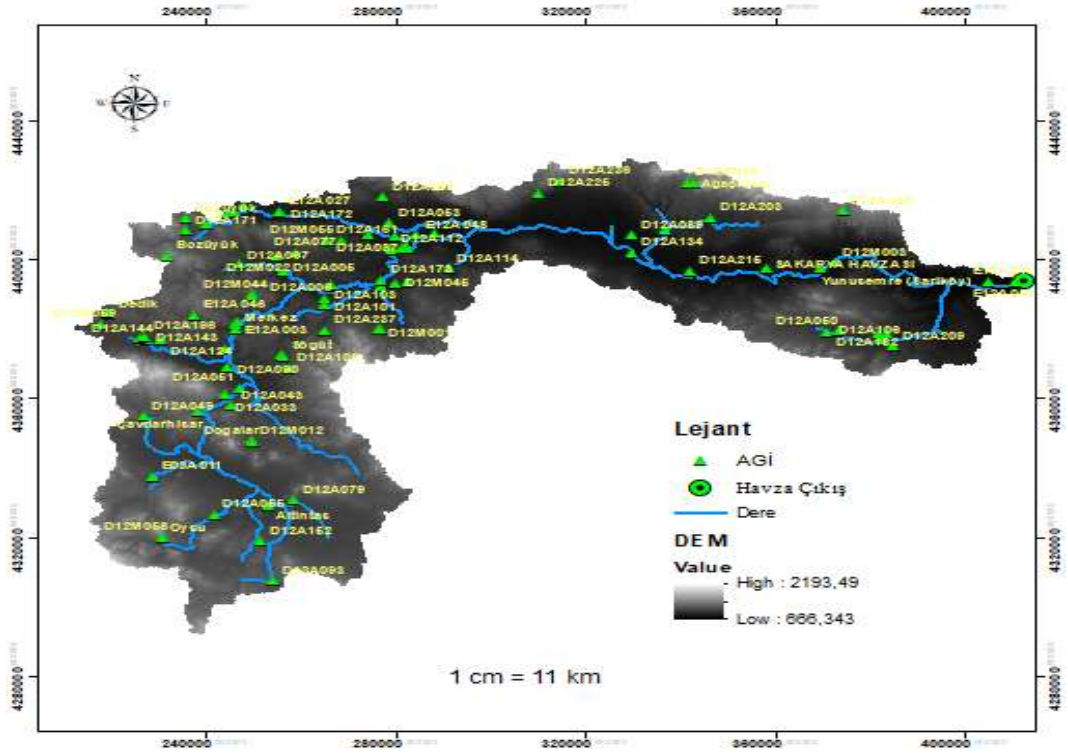
Şekil 4.1’de gösterilen iklim gridleri, Porsuk Havzası genelinde toplam 93 gridi kapsamaktadır. Her bir grid noktasının iklim projeksiyon verileri temin edilmiştir. Bu çalışma döneminde, havza geneli kuraklık analizleri grid değerlerinin ortalaması alınarak yürütülmüştür. Her bir gridin iklim projeksiyon verileri kullanılarak da CBS ortamında olası kuraklık haritaları oluşturulmuştur.

4.2 Porsuk Havzası Hidrolojik Model Kalibrasyon ve Validasyon Çalışması

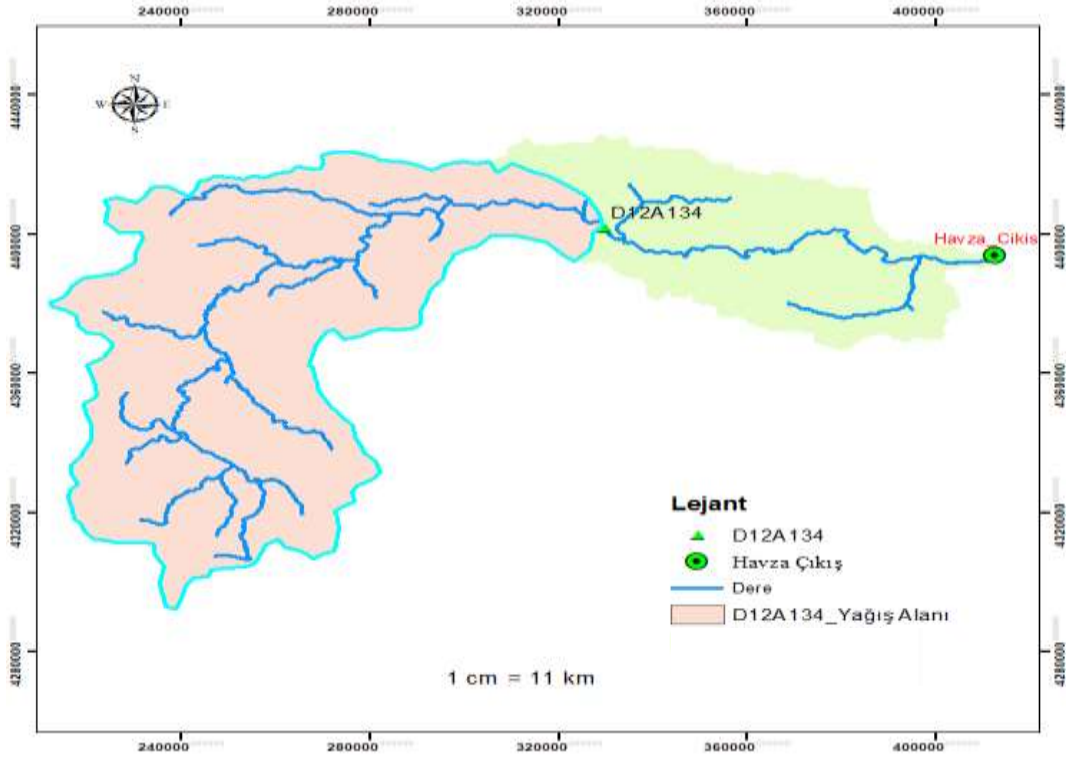
Havza genelinde olası kuraklıkları belirlemek için hidrolojik ve meteorolojik kuraklık analizleri yürütülmüştür. Geleceğe yönelik meteorolojik kuraklık tespitinde temin edilen ham veri direkt kullanılabilirken hidrolojik kuraklığın belirlenmesinde öncelikli olarak geleceğe yönelik olası akım değerlerinin temin edilmesi gerekmektedir.

Bu kapsamda, Havza genelinde temin edilen iklim projeksiyon verileri (yağış, sıcaklık) hidrolojik model kullanılarak akım tahmin değerlerine dönüştürülmüştür. Hidrolojik model tarafından oluşturulan tahmini akım değerlerinin kullanılabilmesi için de gerçek değerlerle karşılaştırılarak modelin kalibrasyonu ve doğrulama işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda, Havzanın genelini kapsayacak ve en az 30 yıllık gerçek akım değerlerinin olduğu akım istasyonları belirlenmiştir.

Porsuk Havzasının genelindeki akım gözlem istasyonları incelendiğinde toplamda 97 istasyon vardır. Fakat bu istasyonların çoğu kapalı olup açık olan istasyonların da birçoğu 10 yıldan fazla verisi bulunmamaktadır. Diğer taraftan havzanın çıkış noktasında fazla istasyon yoktur. Yürütülen analizler sonucunda, D12A134 istasyonunun 1980-2012 yılları arasında 32 yıllık kesintisiz verisinin olduğu ve DSİ Master Plan kapsamında doğrulaştırılmış akımlarının mevcut olduğu görülmüştür. İstasyonun konumu Havza sınırları içerisinde ve çıkış noktasına oldukça yakın olup yağış alanı da 7.580 km² dir. (Şekil 4.2-4.3).



Şekil 4.2 Porsuk Havzası akım gözlem istasyonları (AGİ)

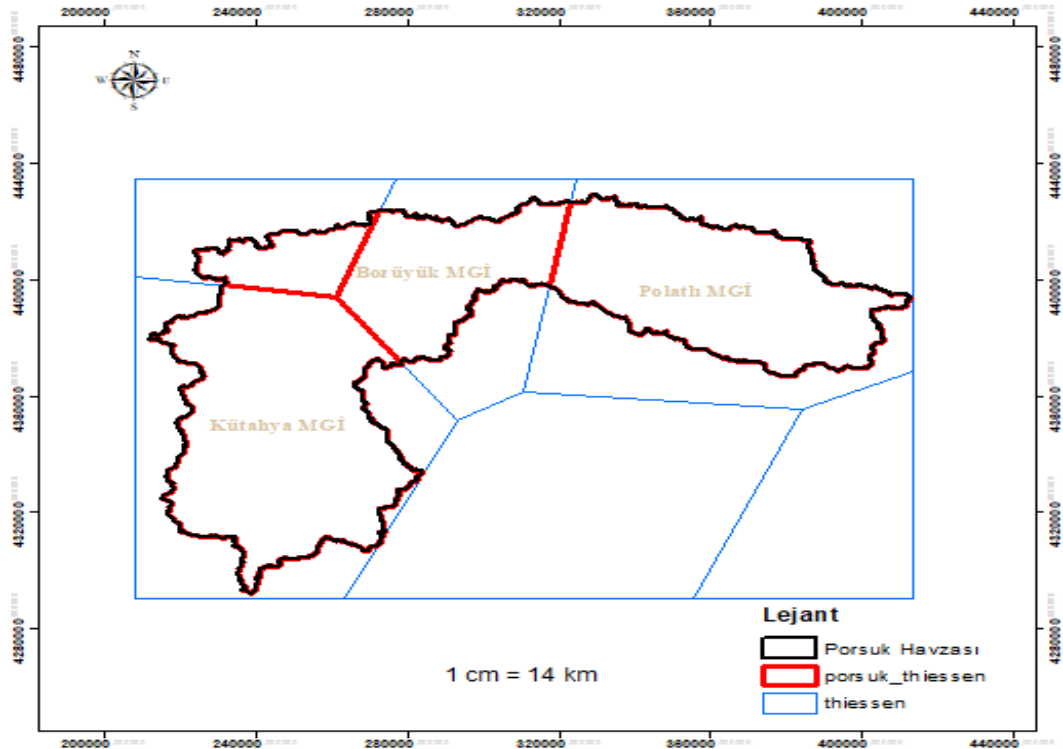


Şekil 4.3 Porsuk Havzası ve D12A134 istasyonu yağış alanı

Porsuk Havzasının yağış alanı 10.740 km²'dir. D12A134 istasyonunun verileri Porsuk Havzasının çıkış noktasına taşınması için yağış alanlarının oranı kullanılmıştır.

Hidrolojik model için gerekli olan akım gözlem istasyon verileri hazırlandıktan sonra kalibrasyon-validasyon işlemlerinin yürütülmesinde modelin simüle edilmiş tahmini akım değerleri için gerekli olan yağış ve sıcaklık verileri havzayı temsil eden Meteoroloji Gözlem İstasyonları (MGİ)'den temin edilmiştir. Havzanın içerisindeki ve yakın çevresindeki MGİ'ler göz önüne alınmıştır.

Yapılan araştırmada, 1980-2012 yılları arasında günlük yağış ve sıcaklık verilerinin mevcut olması ve havzayı temsil etmesi hususları göz önüne alınmıştır. Sonuç olarak 1980-2012 yılları arasında gerekli olan günlük verileri sağlayan ve havzayı temsil eden istasyonlar; Bozüyük MGİ, Polatlı MGİ ve Kütahya MGİ olarak belirlenmiştir. Belirlenen istasyonların havzayı temsil thiesen poligonları Şekil 4.4'te verilmiştir.



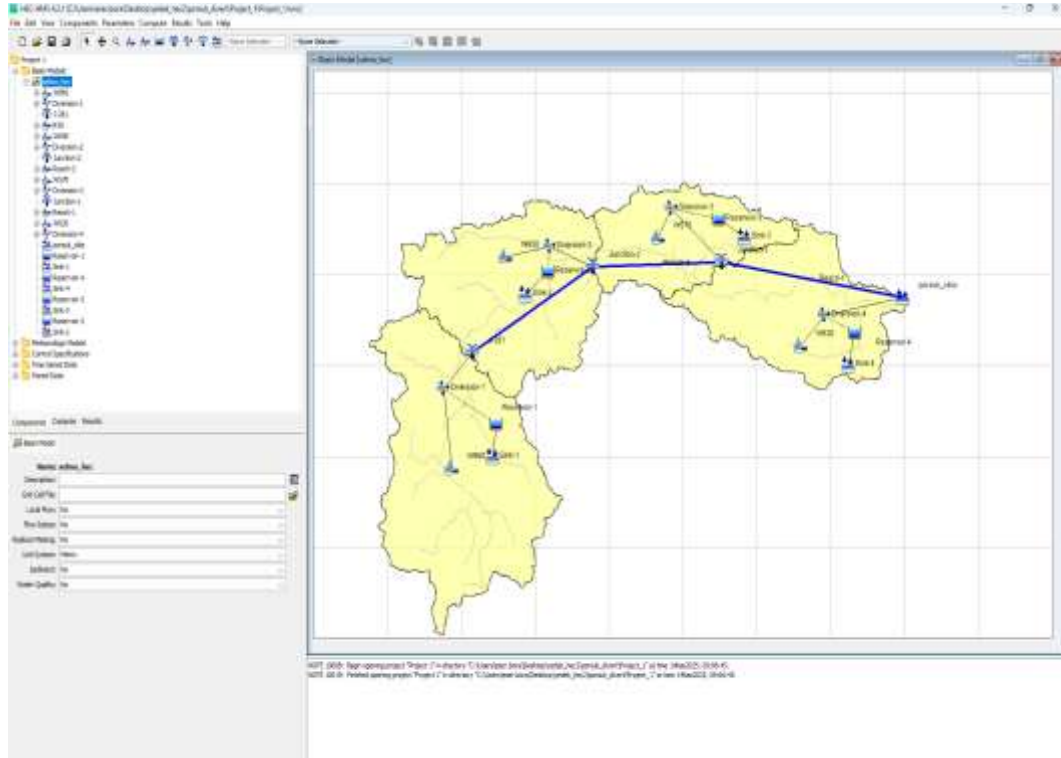
Şekil 4.4 Porsuk Havzası Thiessen poligonu

İstasyonların havzayı temsil etme oranları Kütahya MGİ, %46.57 Bozüyük MGİ, %27.44 ve Polatlı MGİ %25.99'dur. Belirlenen oranlara göre günlük veriler HEC-HMS modelinde tanımlandıktan sonra tahmini akım değerleri oluşturulmuştur.

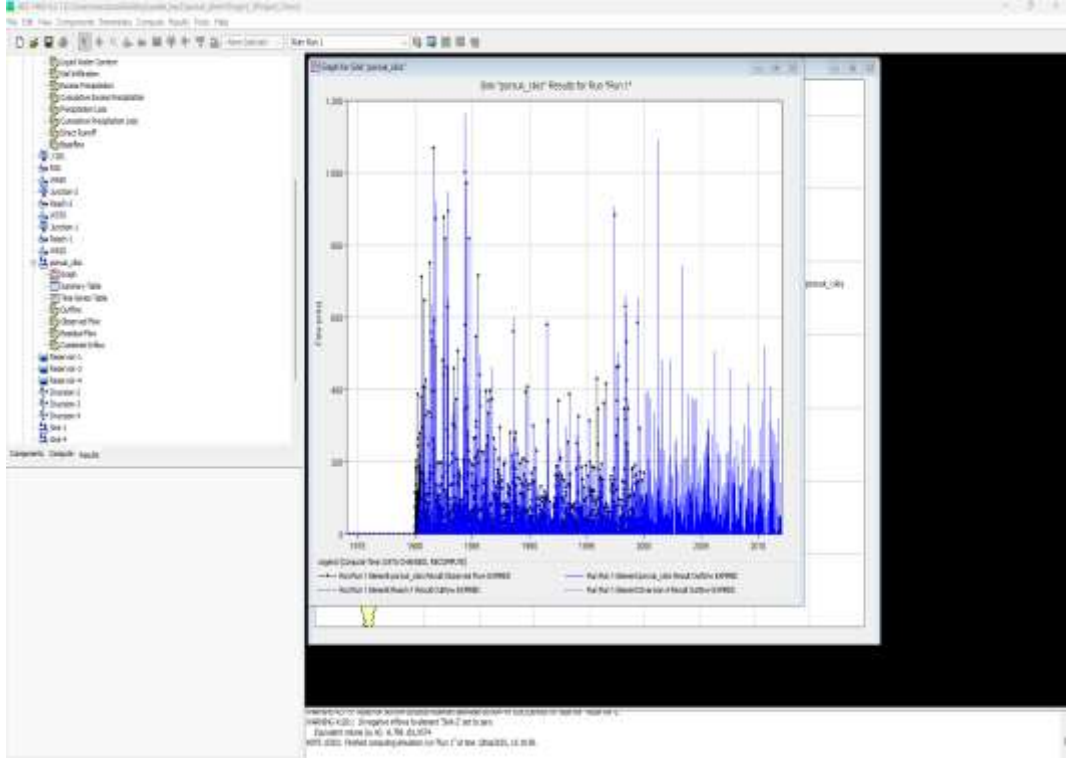
4.2.1 Porsuk havzası kalibrasyon çalışması

HEC-HMS modelinin çalıştırılması için gerekli olan CBS verileri ile yağış, sıcaklık ve gözlenen akım verileri hazırlandıktan sonra model tahmini akım değerleri oluşturulmaktadır.

Kalibrasyon çalışması için 1980-2012 yılları arası mevcut olan gözlenen akım değerlerinden 1980-2000 arasındakiler kullanılmıştır. 2000-2012 arası veriler ise validasyon (doğrulama) çalışması olarak değerlendirilmiştir. Model arayüzü Şekil 4.5'de verilmiştir.

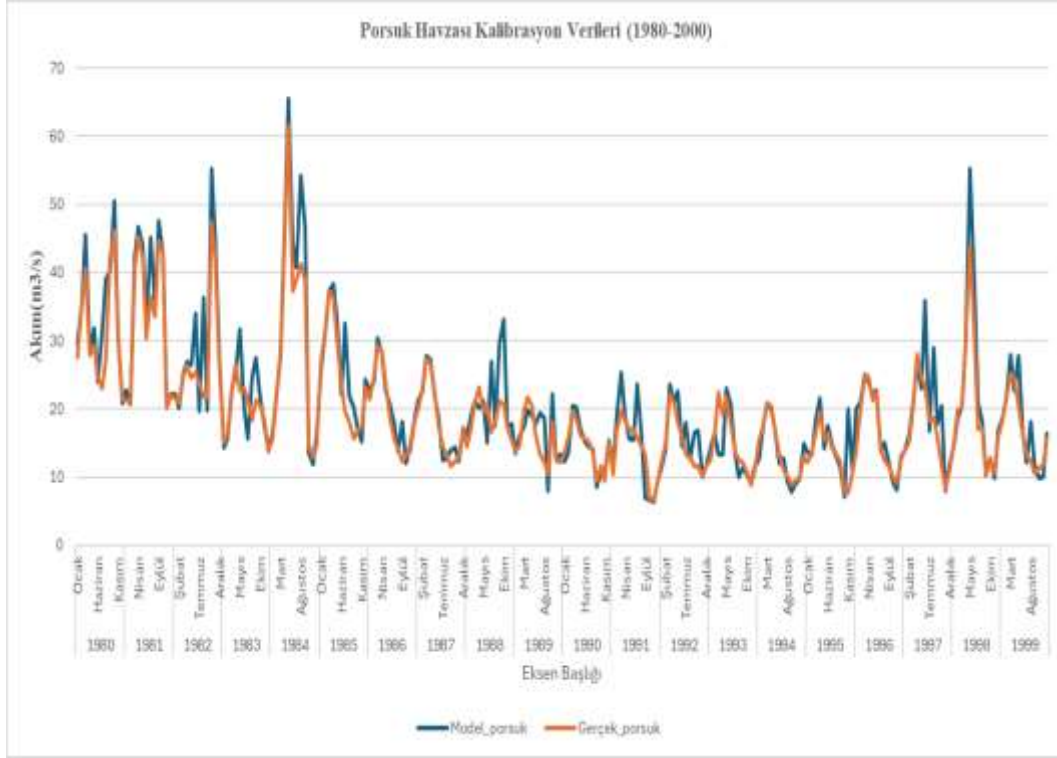


Şekil 4.5 Porsuk Havzası HEC-HMS model arayüzü



Şekil 4.6 Kalibrasyon dönemi gözlenen ve simüle edilen akım zaman serileri

Şekil 4.6’da model tarafından hesaplanan akım değerleri ile gözlenen akımın zaman içindeki değişimi birlikte gösterilmiştir. Grafik, özellikle yüksek akım dönemlerinde modelin genel eğilimi yakaladığını, ancak bazı piklerde sınırlı sapmaların ortaya çıktığını göstermektedir. Düşük akım koşullarında ise simüle edilen değerlerin gözlenen akımı daha istikrarlı biçimde izlediği görülmektedir. Bu bulgular, modelin havzanın temel akım dinamiklerini büyük ölçüde yansıttığını, ancak ani yükselişlerin yaşandığı dönemlerde kısmi farklar oluşabildiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.7 Porsuk Havzası HEC-HMS kalibre edilmiş model ve gerçek akım değerleri (1980-2000)

Kalibrasyon çalışmasındaki temel amaç simülasyon verilerinin gerçek akım değerlerine yaklaşmasını sağlamaktır. Bu amaç doğrultusunda, HEC-HMS modelinde oluşturulan Porsuk Havzası, alt havza bazında model parametreleri değiştirilerek gözlenen akım değerine yaklaştırılması sağlanmıştır. (Şekil 4.7)

Alt havzalara ait kalibrasyon parametreleri, yağış-sonrası akım davranışının ve yüzey-su etkileşiminin modele doğru biçimde yansıtılmasında temel bir rol oynamıştır. Bu çalışmada kullanılan durgunluk sabiti ve akım düşüş katsayısı, her alt havzanın kendi hidrolojik yapısına göre farklı değerler almıştır; bu yaklaşım, taban akımının havzadan havzaya değişen çekilme hızını gerçekçi biçimde temsil etmeyi amaçlamaktadır. Başlangıç debisi değerleri ise akımın ilk tepkisini tanımlamak üzere düşük düzeylerde belirlenmiş ve alt havzaların büyüklüğü ile topoğrafik özelliklerine göre uyarlanmıştır. Eşik tipinin tüm alt havzalarda tepe akımına göre seçilmesi, yüzey akışının modele dâhil edilmesinde ortak bir kriter oluşturmuştur. Oran parametresi her havzada farklılık göstermiş, bu sayede akım bileşenlerinin dağılımı arazi özelliklerine göre dengelenmiştir.

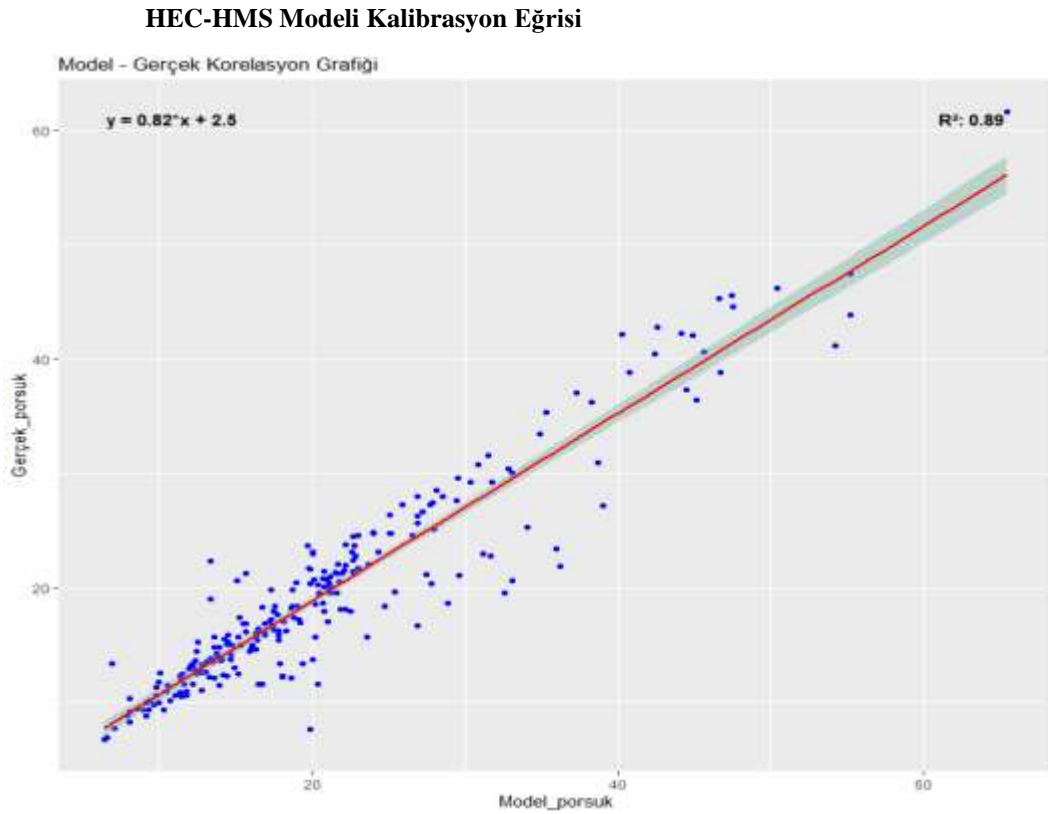
Eğri numarası değerlerinin 59–65 bandında kalması, çalışma alanında yüzey koşullarının orta geçirgenlikte olduğunu ve infiltrasyonun belirli ölçüde sürdüğünü ortaya koymaktadır. Geçirimsiz alan oranlarının düşük olması (%0.9–2), havza genelinde doğal yüzeylerin ağırlıkta olduğunu desteklemektedir. Gecikme süresi için belirlenen 90–240 dakikalık aralık ise yağışın havza çıkışına ulaşma süresinin havzalar arasında bariz biçimde değiştiğini göstermektedir. Modelde tüm alt havzalarda aynı kayıp yöntemi (SCS Eğri Numarası), aynı taban akımı yaklaşımı (akımın düşüş süreci) ve aynı dönüştürme yöntemi (SCS Birim Hidrografi) kullanılarak hesaplamaların tutarlı bir çerçevede ilerlemesi sağlanmıştır. Bu parametre seti, havzanın fiziksel özellikleri ile uyumlu, dengeli ve açıklanabilir bir kalibrasyon yapısının oluşmasına katkı sağlamıştır. Bu tez çalışması için parametrelerin sayısal değerleri Çizelge 4.1'de ayrıntılı biçimde verilmiştir.

Çizelge 4.1 Porsuk Havzası HEC-HMS modeli kalibrasyon parametreleri

Kalibrasyon Parametreleri	Parametre Yöntemleri/Değerleri			
	1.Alt Havza	2.Alt Havza	3.Alt Havza	4.Alt Havza
	A: 3901.3 km ²	A: 2868.9 km ²	A: 1607.6 km ²	A: 2362.8 km ²
Durgunluk Sabiti	0.5	0.05	0.05	0.1
Başlangıç Debisi	0.0001	0.002	0.02	0.02
Akım Çekilme Katsayısı	0.5	0.1	0.05	0.5
Eşik Tipi	Tepe akıma oran	Tepe akıma oran	Tepe akıma oran	Tepe akıma oran
Oran	0.002	0.05	0.05	0.7
Eğri Numarası	60	59	65	62
Geçirimsizlik Oranı (%)	0.9	1	2	2
Gecikme Süresi	120	90	240	120
Kayıp Yöntemi	SCS Eğri Numarası	SCS Eğri Numarası	SCS Eğri Numarası	SCS Eğri Numarası
Taban Akım Yöntemi	Akımın Düşüş Süreci	Akımın Düşüş Süreci	Akımın Düşüş Süreci	Akımın Düşüş Süreci
Dönüşüm Yöntemi	SCS Birim Hidrografi	SCS Birim Hidrografi	SCS Birim Hidrografi	SCS Birim Hidrografi

Kalibrasyon parametreleri belirlendikten sonra modelin Porsuk Havzası'ndaki akım süreçlerini ne kadar doğru temsil ettiğini değerlendirmek amacıyla R^2 , NSE ve RMSE performans ölçütleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, modelin hidrolojik davranışı büyük ölçüde başarılı bir şekilde yakaladığını göstermektedir.

Kalibrasyon sonunda **R^2 değerinin 0.89** çıkması, simüle edilen akımlar ile gözlenen akımlar arasında güçlü ve tutarlı bir ilişki bulunduğunu göstermektedir. Bu uyum, özellikle değişken yağış rejimine sahip Porsuk Havzası gibi karmaşık bir alanda modelin doğruluğu açısından önemli bir göstergedir. (Şekil 4.8).

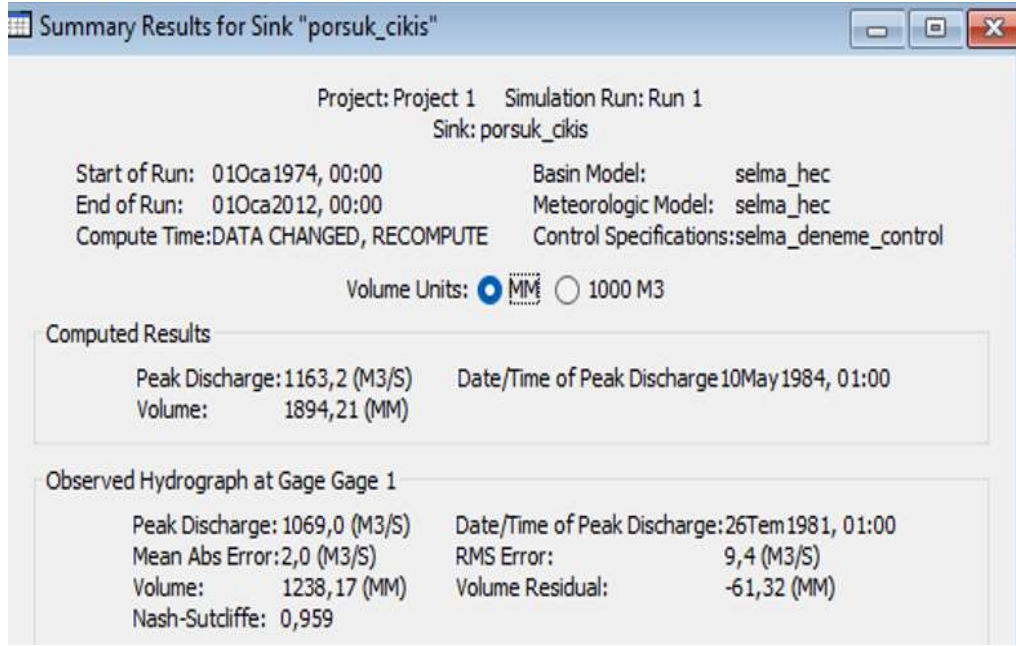


Şekil 4.8 Kalibrasyon korelasyon grafiği (Model-Gözlem)

Model performansının daha bütüncül bir ölçütü olan **NSE değerinin 0.96** olması, modelin akım zamanlamasını, debi miktarlarını ve hidroğrafın genel formunu oldukça başarılı biçimde yeniden üretebildiğini ortaya koymaktadır. Bu seviyedeki bir NSE

değeri, modelin hem düşük hem yüksek akım dönemlerinde güvenilir sonuçlar verdiğini işaret eder (Şekil 4.9).

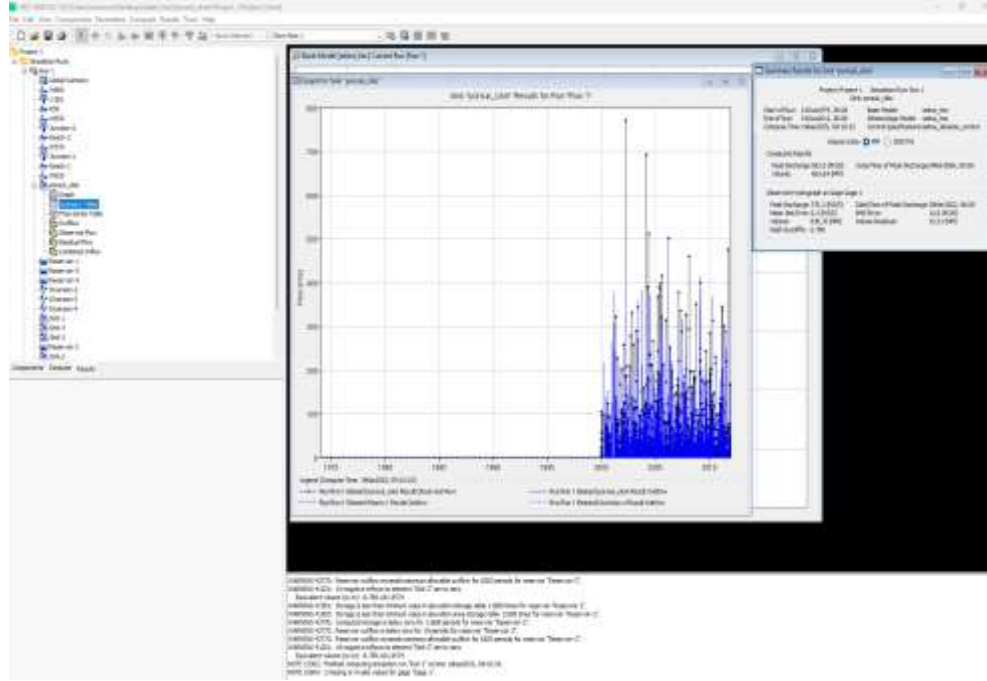
Kalibrasyonda elde edilen **RMSE değerinin 9.4** olarak hesaplanması ise modelin hata düzeyinin kabul edilebilir aralıkta olduğunu göstermektedir. Bu değer, akım gözlemlerinin doğal değişkenliğiyle birlikte değerlendirildiğinde, modelin kalibrasyon döneminde dengeli bir performans sergilediğini doğrulamaktadır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 Kalibrasyon analizine ait HEC-HMS özet sonuçları

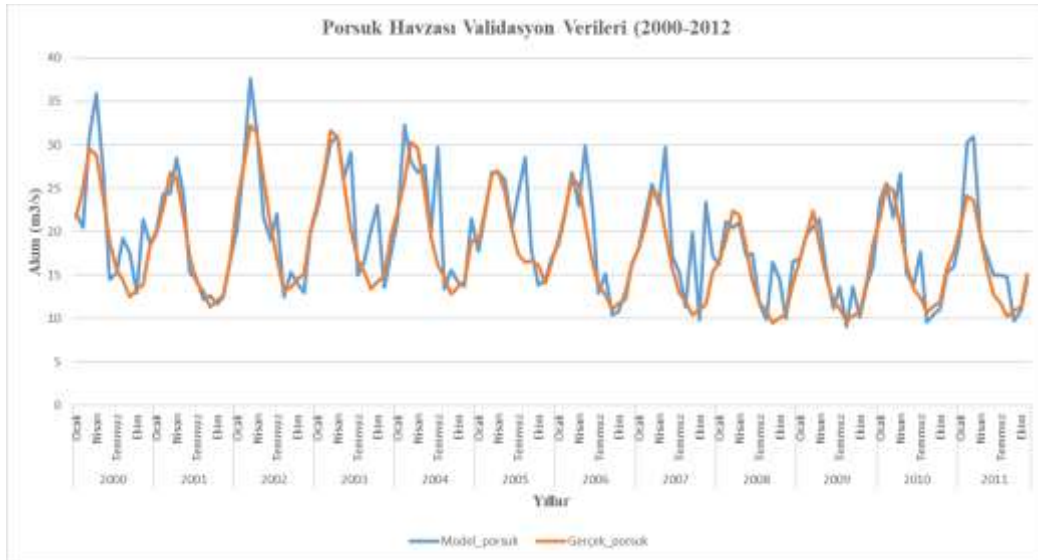
4.2.2 Porsuk havzası doğrulama (validasyon) çalışması

Modelin güvenilirliğini sınamak amacıyla yapılan doğrulama (validasyon) çalışması, 2000–2012 yılları arasındaki gözlem verileri kullanılarak yürütülmüştür. Bu aşamada, kalibrasyon döneminde belirlenen parametre değerleri korunmuş ve aynı yöntemle elde edilen yağış ile sıcaklık verileri modele uygulanmıştır. HEC-HMS yardımıyla üretilen simülasyon sonuçları, aynı döneme ait gözlenen akım değerleriyle karşılaştırılarak modelin öngörü doğruluğu değerlendirilerek kalibrasyon sonrası modelin doğrulama döneminde de kabul edilebilir bir performans sergilediğini ortaya konmuştur. (Şekil 4.10).



Şekil 4.10 Validasyon dönemi gözlenen ve simüle edilen akım zaman serileri

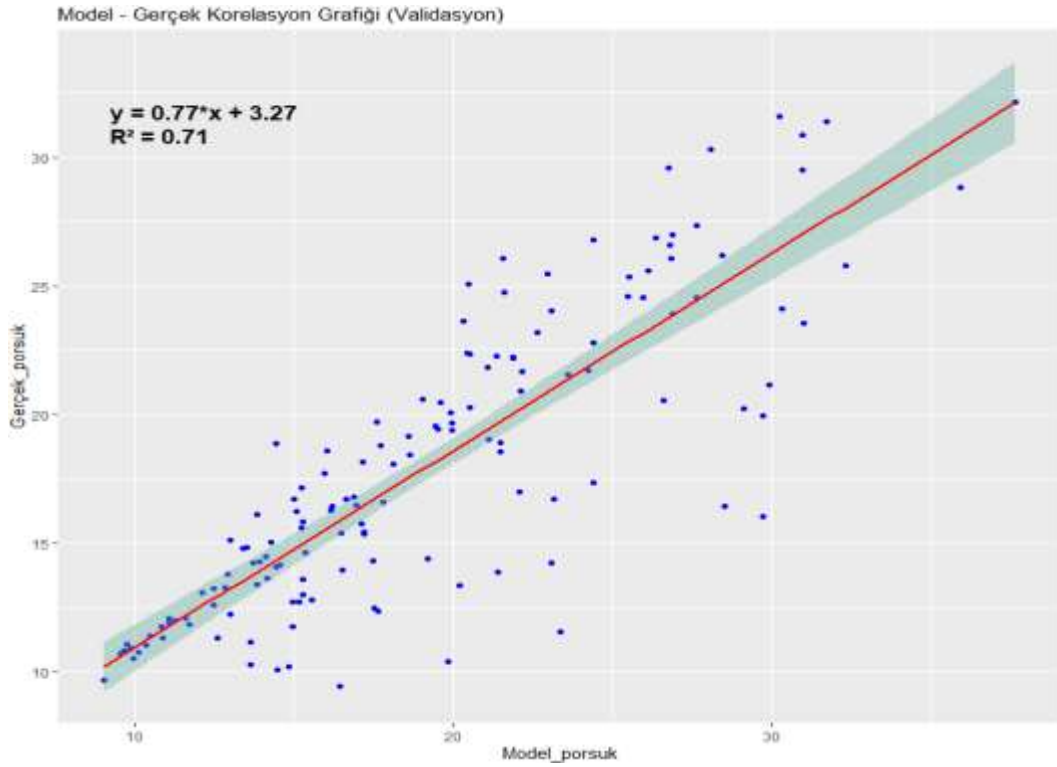
Model performansının istatistiksel olarak değerlendirilmesinde de yine belirtme katsayısı (R^2), ortalama karekök hatası (RMSE) ve Nash–Sutcliffe Verimlilik Katsayısı (NSE) kullanılmıştır.



Şekil 4.11 Porsuk Havzası HEC-HMS kalibre edilmiş model ve gerçek akım değerleri (1980-2000)

Şekil 4.11 incelendiğinde grafikte yer alan kalibre edilmiş model akımları ile gözlenen akım değerleri genel olarak birbirine yakın seyrederken, özellikle pik akımların görüldüğü dönemlerde modelin zaman zaman gerçek akımı biraz daha yüksek yansıttığı görülmektedir. Akımın mevsim değişimlerine verdiği tepki ve düşük akım dönemlerindeki uyum dikkate alındığında, modelin havzanın akım yapısını büyük ölçüde başarıyla izlediği ve validasyon dönemine makul bir doğrulukla uyum sağladığı anlaşılmaktadır.

HEC-HMS Modeli Validasyon Eğrisi



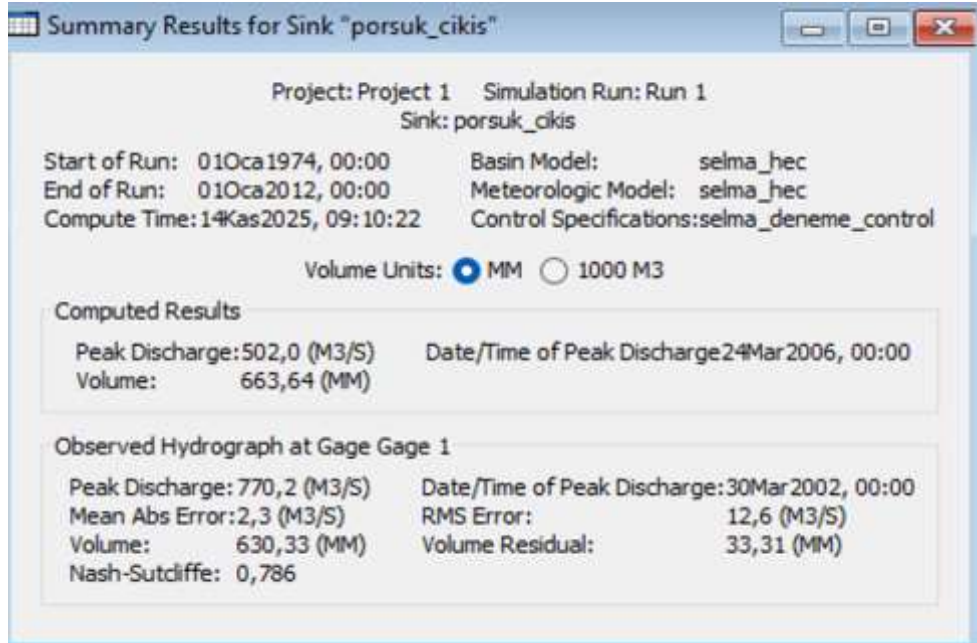
Şekil 4.12 Porsuk Havzası HEC-HMS modeli validasyon eğrisi (2000-2012)

Doğrulama dönemine ait gözlenen ve simüle edilen akım değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, model tarafından elde edilen belirtme katsayısının (R^2) **0.71** olduğu görülmektedir. Bu değer, HEC-HMS modelinin Porsuk Havzası'ndaki akım değişimlerini oldukça iyi temsil ettiğini ve simülasyon sonuçlarının gözlemlerle yüksek düzeyde uyum sağladığını göstermektedir.

Bununla birlikte, yalnızca R^2 katsayısına dayanarak modelin başarısını tam olarak değerlendirmek mümkün değildir. Gözlenen ve tahmin edilen değerler arasındaki farkların büyüklüğünü daha doğru şekilde yorumlayabilmek için ortalama karekök hatası (RMSE) değerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Böylece, modelin genel eğilimi doğru yakalamasının yanı sıra, tahmin doğruluğu da istatistiksel olarak desteklenmiş olur.

Doğrulama dönemi kapsamında, 2000–2012 yılları arasındaki aylık ortalama RMSE değeri, HEC-HMS modeli için yaklaşık **12.6 m³/s** olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, modelin tahmin ettiği akım değerlerinin gözlemlerle genel olarak yüksek düzeyde uyumlu olduğunu göstermektedir (Şekil 4.13).

Nash–Sutcliffe Verimlilik Katsayısı (NSE) değerinin **0.79** olarak belirlenmesi, modelin Porsuk Havzası'ndaki hidrolojik süreçleri genel olarak başarılı biçimde temsil ettiğini göstermektedir. Bu oran, modelin simüle ettiği akım değerlerinin gözlem verileriyle büyük ölçüde uyumlu olduğunu, ancak belirli dönemlerde bazı sapmaların meydana geldiğini de ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, modelin performansı güvenilir kabul edilmekle birlikte, özellikle ekstrem akım koşullarında kısmi farklılıkların varlığı dikkat çekmektedir (Şekil 4.13).

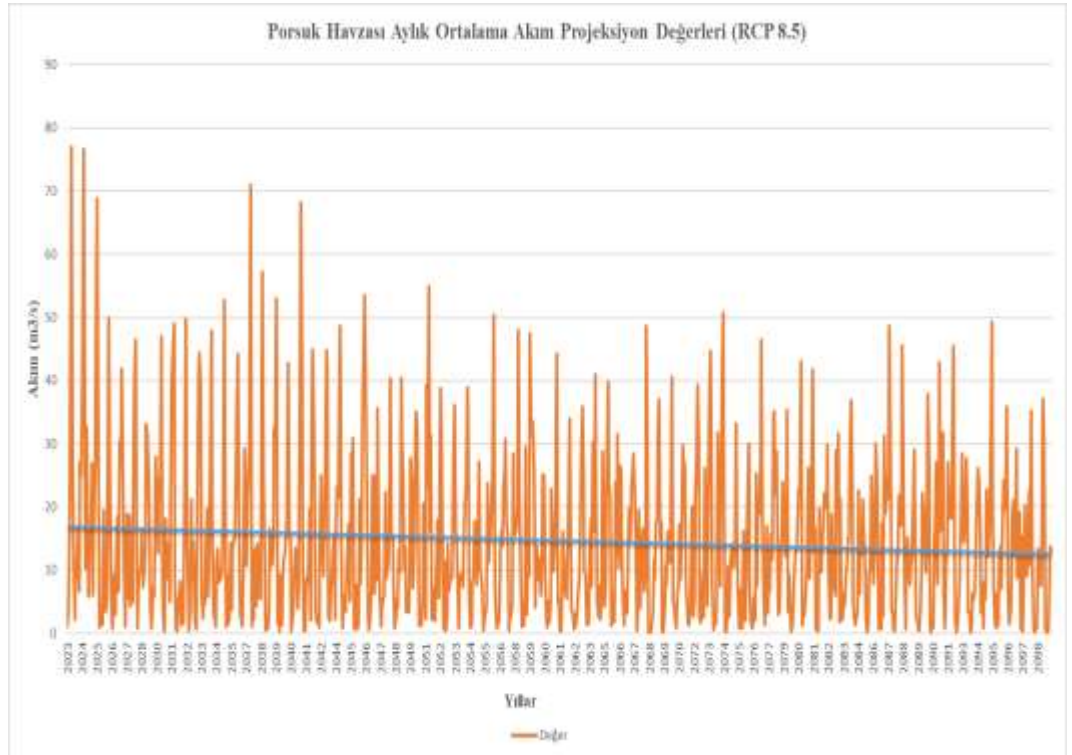


Şekil 4.13 Validasyon analizine ait HEC-HMS özet sonuçları

Sonuç olarak, doğrulama dönemi bulguları, kalibrasyonda elde edilen parametre setinin başka bir zaman aralığında da geçerliliğini koruduğunu göstermiştir. Bu durum, HEC-HMS modelinin Porsuk Havzası'nda uzun dönemli akım tahminleri ve geleceğe yönelik senaryo analizleri için güvenle kullanılabilirliğini ortaya koymaktadır.

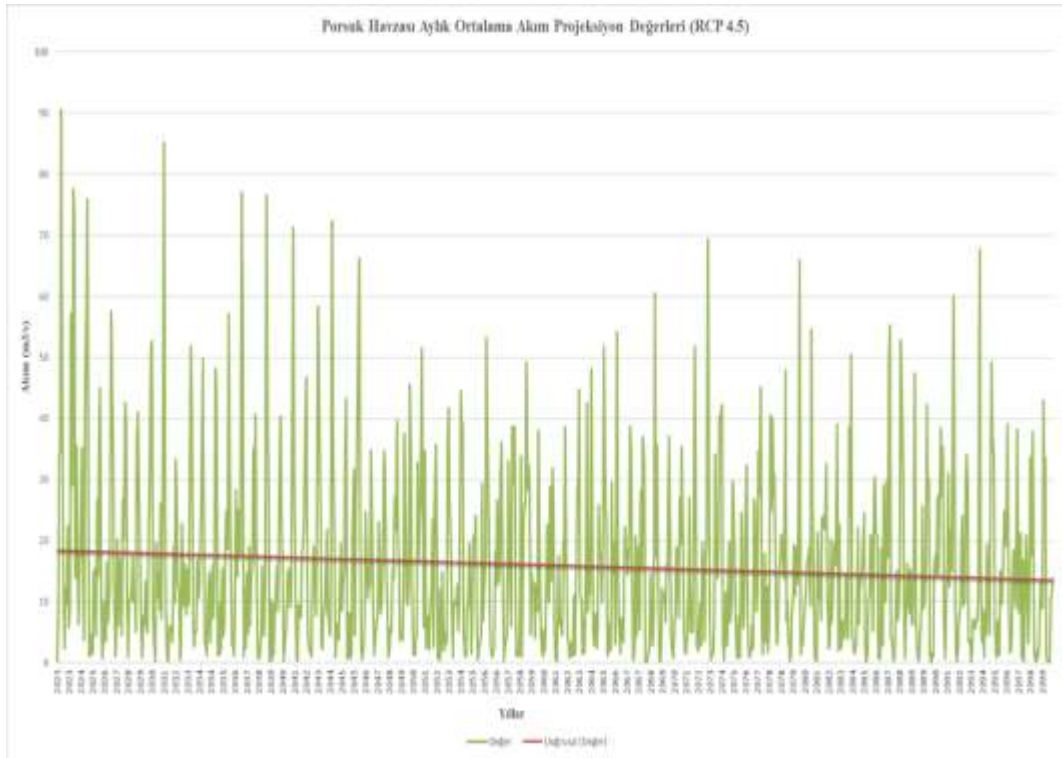
4.2.3 Porsuk havzasının iklim değişikliği altındaki akım projeksiyon verilerinin hazırlanması

Bu alt bölümde, iklim projeksiyon verilerinin HEC-HMS modeline aktarılmasıyla elde edilen akım projeksiyonlarının genel özellikleri sunulmuştur. HEC-HMS modelinin kalibrasyon ve validasyon çalışmaları tamamlandıktan sonra iklim gridlerinin yağış, sıcaklık ve model kalibrasyon parametreleri modelde tanımlandıktan sonra RCP 8.5 ve RCP 4.5 senaryolarına ait 2024-2100 yılları arasında Porsuk Havzasının aylık ortalama akım projeksiyon değerleri elde edilmiştir. Model tarafından oluşturulan akım projeksiyon verilerinin model arayüzü Şekil 4.14'de ve Şekil 4.15'de verilmiştir.



Şekil 4.14 Porsuk Havzasının RCP 8.5 senaryosuna ait aylık ortalama akım projeksiyon değerleri

Şekil 4.14, RCP 8.5 senaryosu altında 2024–2100 dönemine ait aylık akım projeksiyonlarını göstermektedir. Akım değerlerinde dönem boyunca belirgin dalgalanmalar bulunmakla birlikte eğilim çizgisi hafif bir düşüş yönünde ilerlemektedir. Yıllar ilerledikçe yüksek akım tepkilerinin seyrekleştiği, akım miktarlarının ise genel olarak daha düşük bir bantta toplandığı görülmektedir. Bu görünüm, yüksek emisyon koşullarında havzanın yüzey akışının giderek zayıflayabileceğine işaret etmektedir.



Şekil 4.15 Porsuk Havzasının RCP 4.5 senaryosuna ait aylık ortalama akım projeksiyon değerleri

Şekil 4.15 incelendiğinde, RCP 4.5 senaryosu altında 2024–2100 dönemine ait aylık akım projeksiyonlarını göstermektedir. Akım değerleri yıllar boyunca değişken bir yapı sergilese de eğilim çizgisinin hafif bir düşüş yönünde ilerlediği görülmektedir. Dönemin ilk yıllarında daha yüksek akımların ortaya çıktığı, ilerleyen yıllarda ise pik değerlerinin giderek zayıfladığı dikkat çekmektedir. Bu görünüm, orta emisyon senaryosunda dahi havzanın uzun vadede daha düşük akım seviyelerine doğru yöneldiğini düşündürmektedir.

Projeksiyon sonuçları, Porsuk Havzası'nın gelecekteki su potansiyelinde belirgin bir azalma eğilimine işaret etmektedir. RCP 4.5 senaryosunda toplam akım miktarının yaklaşık %17 oranında gerilemesi, orta düzey emisyon koşullarında dahi havzanın su üretme kapasitesinin zayıflayabileceğini göstermektedir. RCP 8.5 senaryosunda bu azalmanın %23'e ulaşması ise daha yüksek ısınma ve artan buharlaşma baskısı altında su potansiyelindeki kaybın daha belirgin hâle geldiğini ortaya koymaktadır. Bu iki bulgu, farklı emisyon senaryolarında havzanın su potansiyelindeki düşüşün giderek belirginleştiğini ve Porsuk Havzası'nın iklim koşullarındaki değişimlere karşı hassas bir yapı sergilediğini göstermektedir.

4.3 Porsuk Havzası Kuraklık Analizleri

Doktora tez çalışmasının esas amacı olan kuraklık analizlerinde 2024-2100 yılları arasındaki olası kuraklıklar değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, geleceğe yönelik iklim projeksiyonları doğrultusunda hem meteorolojik hem de hidrolojik kuraklık koşulları değerlendirilmiştir. Çalışmada, HEC-HMS modeliyle elde edilen akım simülasyonları kullanılarak hidrolojik kuraklık analizleri, aynı döneme ait yağış projeksiyon verileri temel alınarak ise meteorolojik kuraklık analizleri yürütülmüştür.

Kuraklık değerlendirmelerinde uluslararası düzeyde kabul gören iki temel kuraklık indeksi tercih edilmiştir. Hidrolojik kuraklığın incelenmesinde, Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) tarafından önerilen ve akım verileri üzerinden kuraklık koşullarını nicel olarak ifade eden Standart Akım İndeksi (SRI) kullanılmıştır. Bu indeks, belirli bir zaman ölçeğinde akım değerlerinin uzun dönem ortalamalarından sapma derecesini ölçerek, su potansiyelindeki azalışların şiddetini ve süresini tanımlamaktadır.

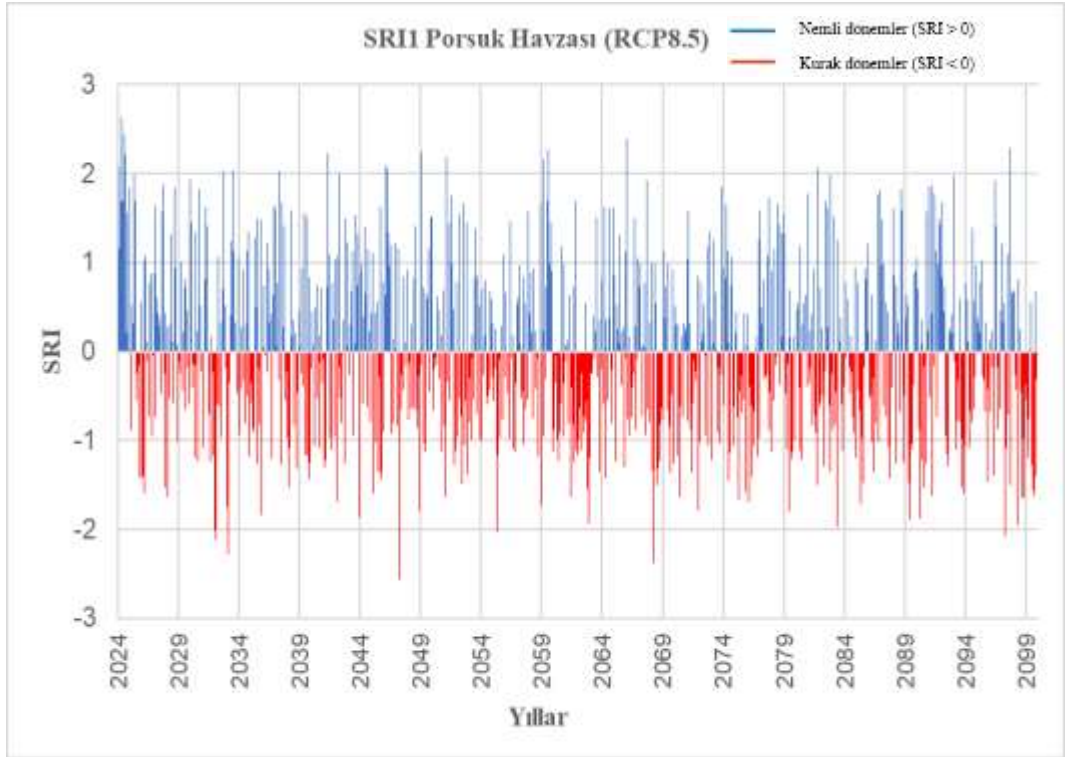
Meteorolojik kuraklık analizlerinde ise, yağış verilerinin istatistiksel dağılımına dayanan Standart Yağış İndeksi (SPI) yöntemi uygulanmıştır. SPI, belirlenen zaman ölçeklerinde (1, 3, 6, 9 ve 12 ay gibi) yağış anomalilerini değerlendirerek, kuraklık olaylarının zamansal değişimini ortaya koymaktadır. Bu iki indeksin birlikte kullanılmasıyla, Porsuk Havzası'nda hem yağış eksikliğine dayalı meteorolojik kuraklık hem de akım azalışına bağlı hidrolojik kuraklık eğilimleri karşılaştırmalı biçimde analiz edilmiştir.

Bu yaklaşım, havzadaki su potansiyelinin gelecekteki davranışını daha kapsamlı değerlendirmeye olanak sağlamış; iklim değişikliğinin farklı etkilerini bütüncül bir çerçevede ortaya koymuştur.

4.3.1 Porsuk havzası standart yüzeyakış indeksi (SRI) sonuçları (RCP 8.5)

Porsuk Havzasında, kalibrasyon-validasyon işlemlerinden sonra iklim projeksiyon verilerinin (yağış, sıcaklık) hidrolojik modelde tanıtılmasıyla birlikte 2024-2100 yılları arasında, kötümser senaryoya bağlı (RCP 8.5) akış projeksiyon verileri elde edilmiştir. Elde edilen veriler, uluslararası literatürde temel hidrolojik kuraklık indeksi olarak tanımlanan standart yüzeyakış indeksi (SRI)'nin hesaplamasında kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, hidrolojik modelden elde edilen geleceğe yönelik akım verileri SRI hesaplamasında kullanılmıştır. Sonuçlar, 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık periyotlarda incelenmiştir.

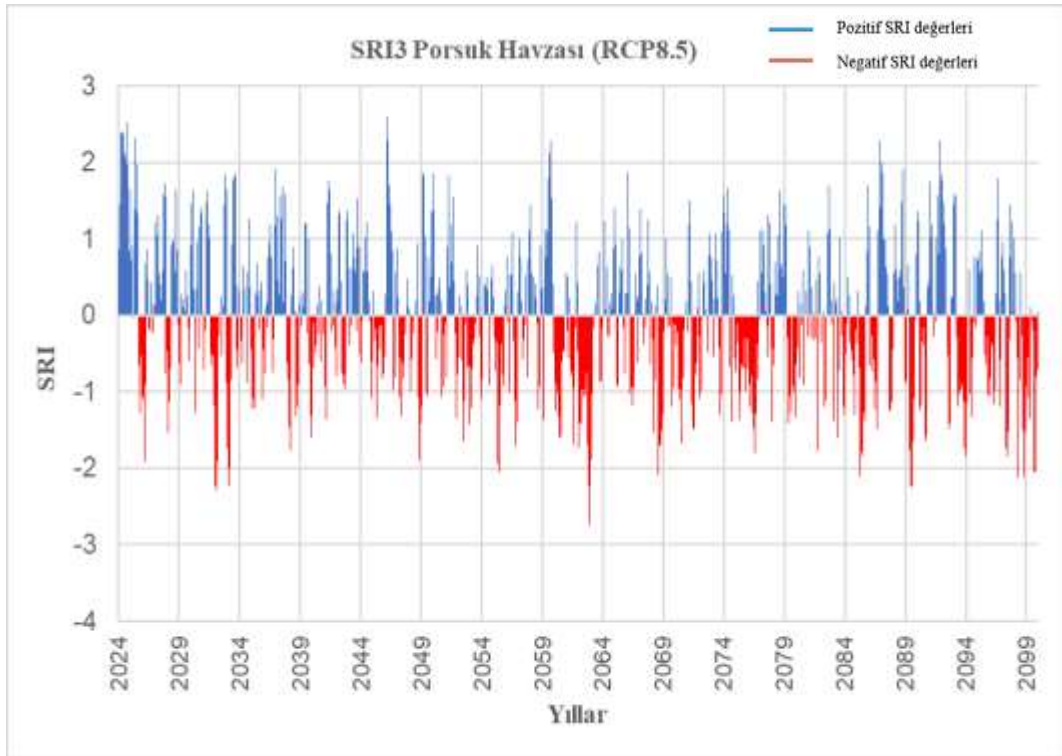


Şekil 4.16 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SRI sonuçları

2024-2100 yılları arasında aylık olarak incelenen SRI sonuçlarına bakacak olursak kurak periyotların daha fazla olduğu ve gelecek zaman sürecinde, kuraklık şiddetinin artacağı öncelikli olarak dikkat çekmektedir.

Şekil 4.16'da Porsuk Havzası kapsamında hesaplanan SRI1 indeksinin kuraklık riski incelendiğinde, 2024-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 yılları kendi arasında değerlendirilerek kendi arasında karşılaştırılmıştır.

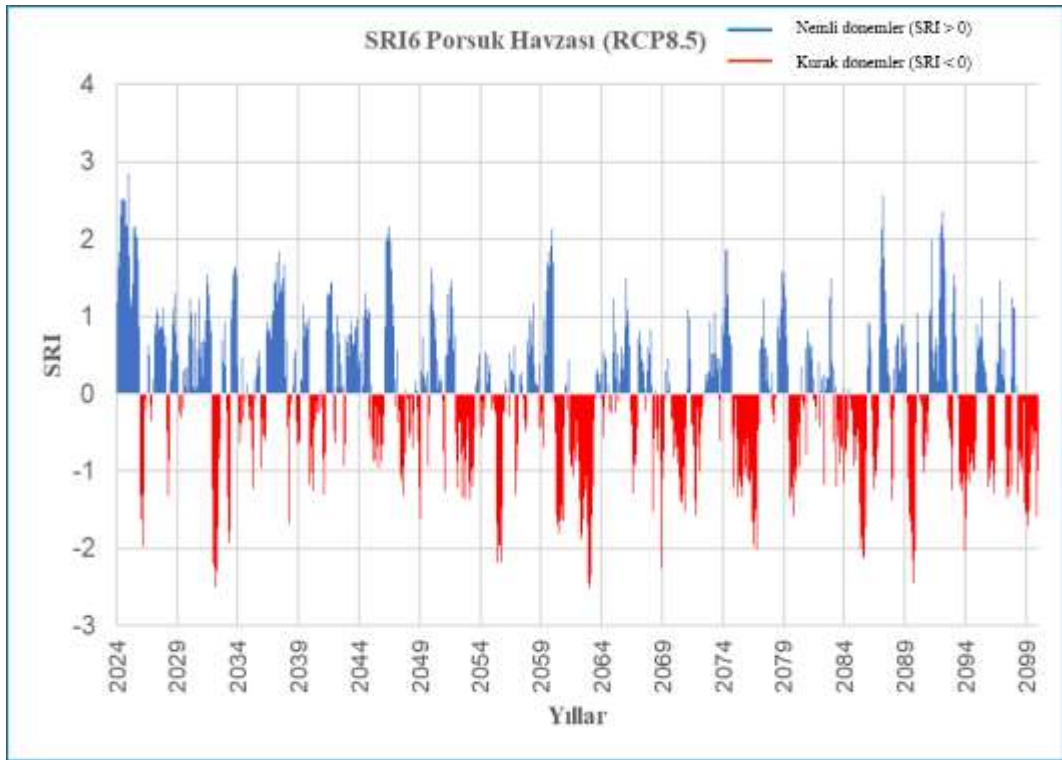
2024-2050 yılları arasında SRI1 indeks sonuçlarına göre %38.69 orta şiddetli kurak, %14.3 şiddetli kurak ve %1.19 çok şiddetli olarak hidrolojik kuraklık olasılıkları belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %37.15 orta şiddetli kurak, %15.97 şiddetli kurak ve %0.69 çok şiddetli olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %35 orta şiddetli kurak, %18.7 şiddetli kurak ve %0.33 çok şiddetli olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.17 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SRI3 sonuçları

2024-2100 yılları arasında, ocak-şubat-mart aylarının birlikte ele alınarak 3 aylık periyotlar halindeki SRI analizlerinin verildiği Şekil 4.17 incelendiğinde ise kuraklık şiddetinin özellikle 2050 yılından sonra artabileceği öngörülmektedir.

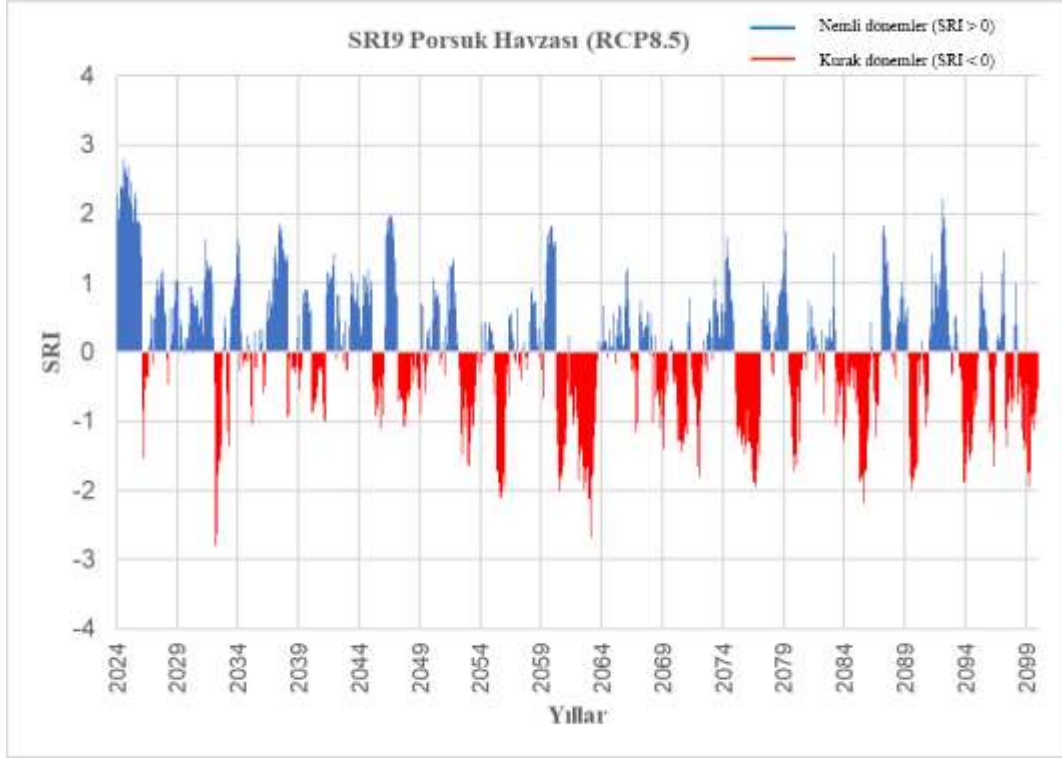
Kuraklık risk değerlendirmesine göre 2024-2050 yılları arasında %46 orta şiddetli kurak, %9.52 şiddetli kurak ve %1.78 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %36.11 orta şiddetli kurak, %15.97 şiddetli kurak ve %1.38 çok şiddetli olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %34 orta şiddetli kurak, %19 şiddetli kurak ve %2.33 çok şiddetli kurak olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.18 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SRI6 sonuçları

Şekil 4.18’de, Ocak’tan Haziran’a kadar olan altı aylık dönemin hidrolojik kuraklık şiddet değerleri incelendiğinde, yıllar bazında kuraklık yoğunluklarının daha belirginleştiği ve kuraklık periyodunun nemli dönemlere kıyasla daha uzun sürebileceği açıkça ortaya konmaktadır.

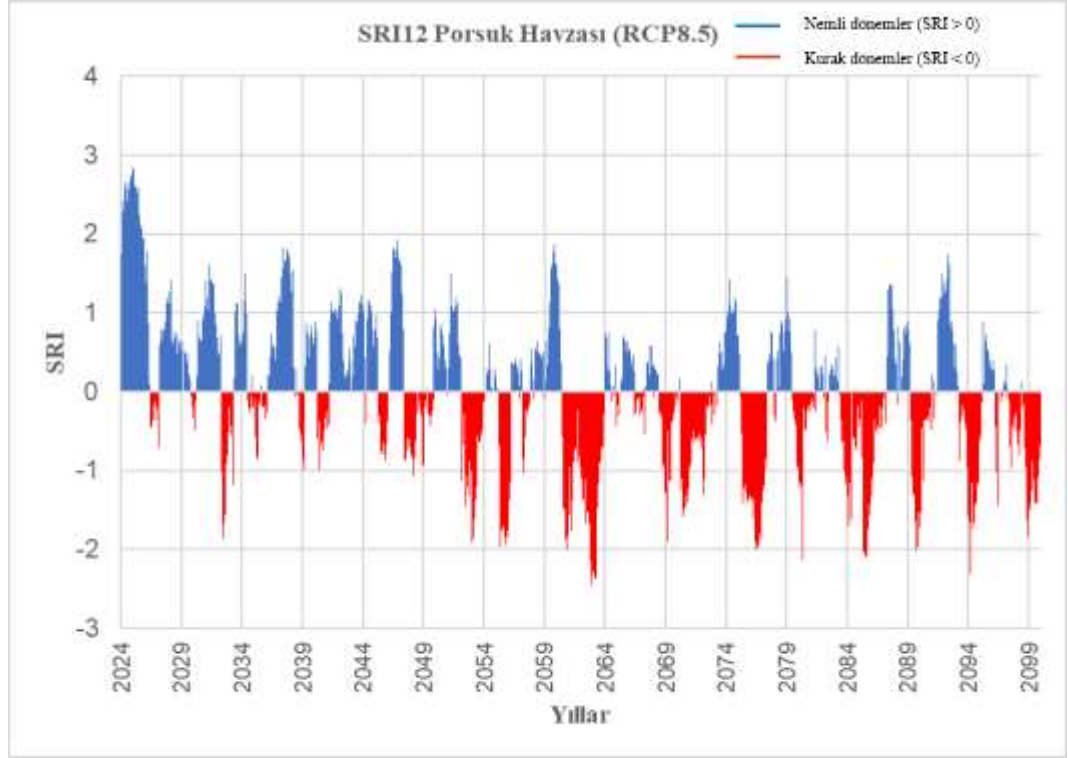
Kuraklık risk değerlendirmesine göre 2024-2050 yılları arasında %54 orta Şiddetli kurak, %6.84 Şiddetli kurak ve %1.19 çok Şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %27.77 orta Şiddetli kurak, %15.62 Şiddetli kurak ve %2.77 çok Şiddetli olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %19.33 orta Şiddetli kurak, %22 Şiddetli kurak ve %2.33 çok Şiddetli kurak olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.19 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SRI9 sonuçları

Ocak ayından baŐlayarak eylül ayna kadarki 9 aylık periyodun incelendiği SRI9 hidrolojik kuraklık indeks sonuçlarının verildiği, Şekil 4.19 incelendiğinde ise özellikle 2050 yılından sonraki her 10 yılda birçok Şiddetli kuraklık eğiliminin olabileceği görülebilmektedir.

Kuraklık risk değerlendirmesine göre 2024-2050 yılları arasında %58.6 orta Şiddetli kurak, %4.46 Şiddetli kurak ve %0.59 çok Şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %24.65 orta Şiddetli kurak, %19.09 Şiddetli kurak ve %2.77 çok Şiddetli olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %14.3 orta Şiddetli kurak, %25 Şiddetli kurak ve %0.33 çok Şiddetli kurak olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.20 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SRI12 sonuçları

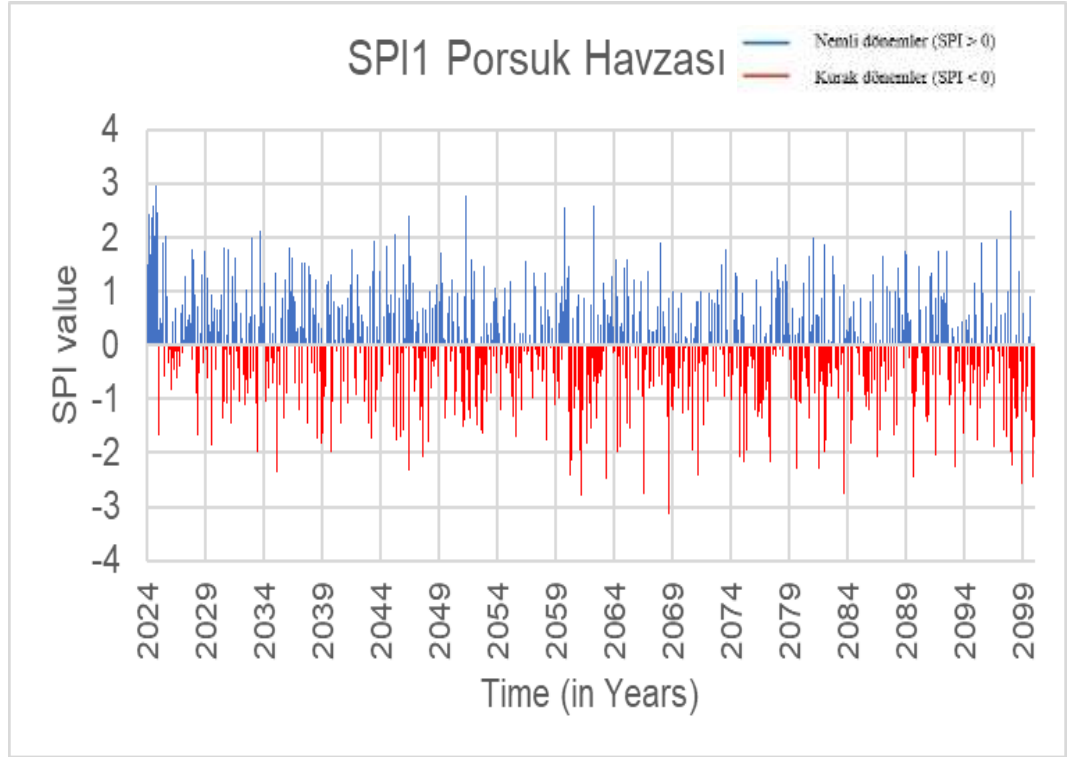
Porsuk Havzası genelinde yıllık olarak analiz edilen SRI12 incelendiğinde ise kurak ve nemli yıllar net bir şekilde ayrılmakta olup kuraklık şiddetinin 2100 yılına doğru arttığı da görülmektedir.

Kuraklık risk değerlendirmesine göre 2024-2050 yılları arasında %28.27 orta şiddetli kurak, %1.48 şiddetli kurak ve %0 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %32.29 orta şiddetli kurak, %21.52 şiddetli kurak ve %1.73 çok şiddetli olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %36.3 orta şiddetli kurak, %25.33 şiddetli kurak ve %1.3 çok şiddetli kurak olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.20).

SRI'nın hidrolojik kuraklık analizleri genel olarak değerlendirildiğinde, 2024-2099 yılları 3 ayrı periyot (2024-2050, 2050-2075, 2075-2100) şeklinde analiz edilmiştir. Sonuç olarak hidrolojik şiddetli ve çok şiddetli kuraklıkların 2100 yılına doğru arttığı ve orta şiddetli kuraklıkların ise azaldığı sonucuna varılmıştır. Hidrolojik kuraklık analizlerinin yanı sıra bu tez çalışmasında meteorolojik kuraklık analizleri de yapılmıştır.

4.3.2 Porsuk havzası standart yağış indeks (SPI) sonuçları (RCP 8.5)

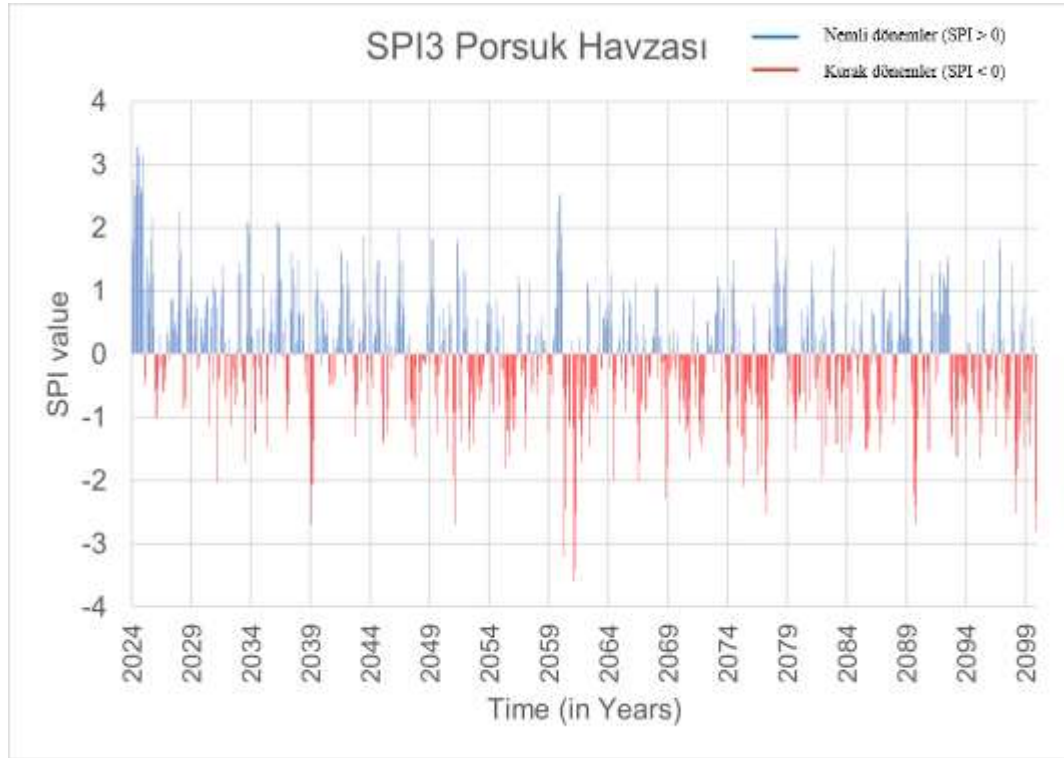
Porsuk Havzası genelinde, iklim değişikliğinin kötümser senaryoya bağlı yağış projeksiyon verileri kullanılarak Standart Yağış İndeks (SPI) analizleri SRI indeksinde olduğu gibi 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık periyotlarda, 2024-2100 yılları arasında analiz edilmiştir. SPI hesaplama yöntemi, SRI formülasyonuna benzerlik göstermekte olup, akım verisi yerine yağış verisi kullanılmaktadır. Her iki indeks, gama dağılımı temel alınarak R Studio ortamında hesaplanmıştır.



Şekil 4.21 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SPI1 sonuçları

Porsuk Havzası genelinde aylık olarak analiz edilen SPI1 meteorolojik kuraklık indeks sonuçlarının verildiği Şekil 4.21 incelendiğinde kuraklık şiddetinin nemlilik durumuna göre daha çok gerçekleştiği ve 2100 yılına doğru kuraklık şiddetinin ve sıklığının arttığını görebiliriz.

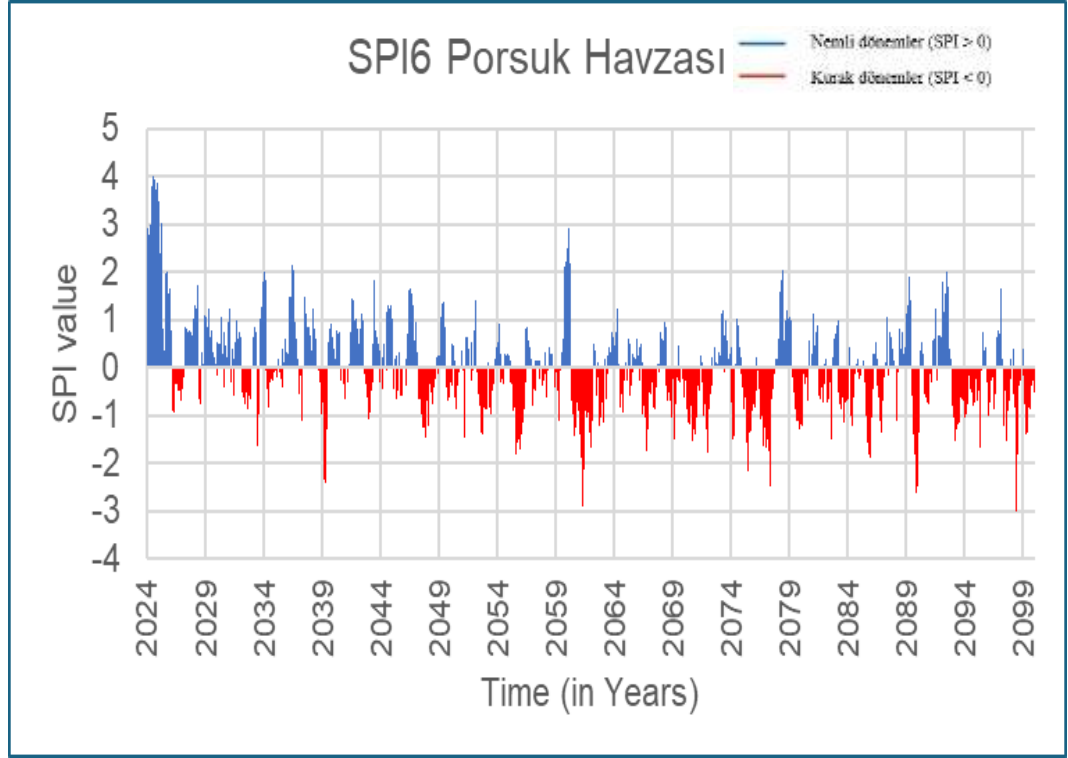
Meteorolojik olarak kuraklık risk değerlendirmesine göre 2024-2050 yılları arasında %48.8 orta şiddetli kurak, %11.3 şiddetli kurak ve %0.89 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %37.84 orta şiddetli kurak, %12.84 şiddetli kurak ve %2.77 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %35.3 orta şiddetli kurak, %13.66 şiddetli kurak ve %4.33 çok şiddetli kurak olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.22 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SPI3 sonuçları

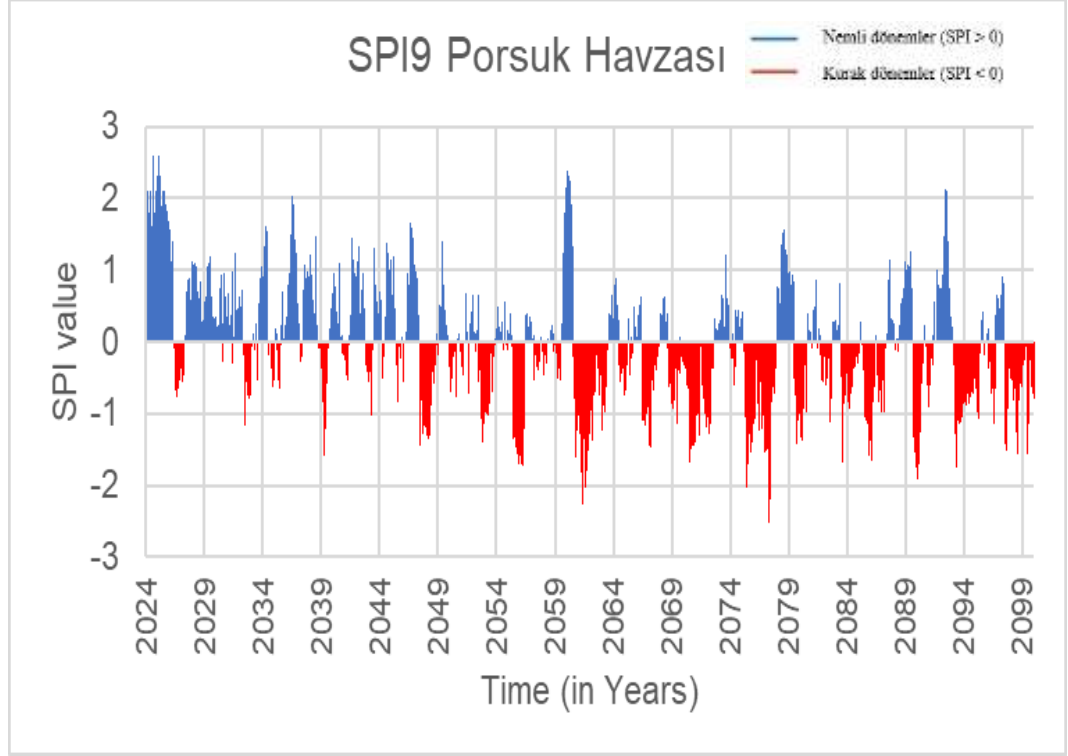
Ocak, Şubat ve Mart aylarına ait SPI3 kuraklık analiz sonuçları Şekil 4.22’de gösterilmiş olup, yıllar ilerledikçe kuraklık şiddetinin belirginleştiği ve 2099 yılına yaklaşırken arttığı anlaşılmaktadır.

Kuraklık risk değerlendirmesine göre 2024-2050 yılları arasında %53.86 orta şiddetli kurak, %6.25 şiddetli kurak ve %1.19 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %40.97 orta şiddetli kurak, %12.84 şiddetli kurak ve %3.12 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %40.3 orta şiddetli kurak, %15.3 şiddetli kurak ve %43 çok şiddetli kurak olarak tespit edilmiştir.



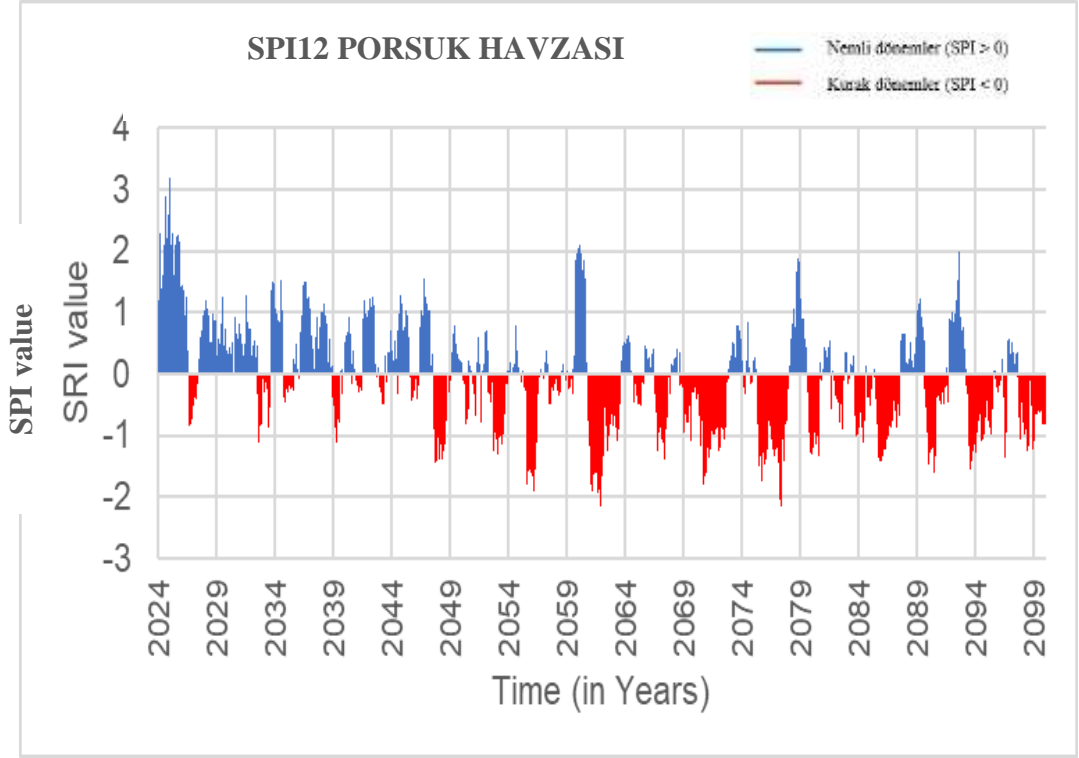
Şekil 4.23 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SPI6 sonuçları

Özellikle, tahıl üretiminin gelişim periyodundaki en önemli periyot olan ocak-haziran aylarını kapsayan 6 aylık kuraklık analizleri, tarımsal açıdan kuraklık uyarısı verebilmektedir. Porsuk Havzası genelindeki SPI6 analizlerinin Kuraklık risk değerlendirmesine göre 2024-2050 yılları arasında %57.73 orta şiddetli kurak, %2.97 şiddetli kurak ve %1.59 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %20.48 orta şiddetli kurak, %18.05 şiddetli kurak ve %0.69 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %15 orta şiddetli kurak, %19 şiddetli kurak ve %2.66 çok şiddetli kurak olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.23).



Şekil 4.24 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SPI9 sonuçları

9 aylık kuraklık analizleri (Ocak-Eylül), hemen hemen tüm tarımsal üretimi etkileyebilecek şekilde sonuçlar üretmektedir. Dolayısıyla, SPI9 çıktıları tarımsal kuraklığı en çok simgeleyen meteorolojik kuraklık indeksi olarak tanımlanabilir. Risk değerlendirmesine göre ise 2024-2050 yılları arasında %61.01 orta şiddetli kurak, %4.16 şiddetli kurak ve %1.01 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %18.75 orta şiddetli kurak, %18.75 şiddetli kurak ve %0.71 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %13.7 orta şiddetli kurak, %20 şiddetli kurak ve %5 çok şiddetli kurak olarak tespit edilmiştir (Şekil 4.24).



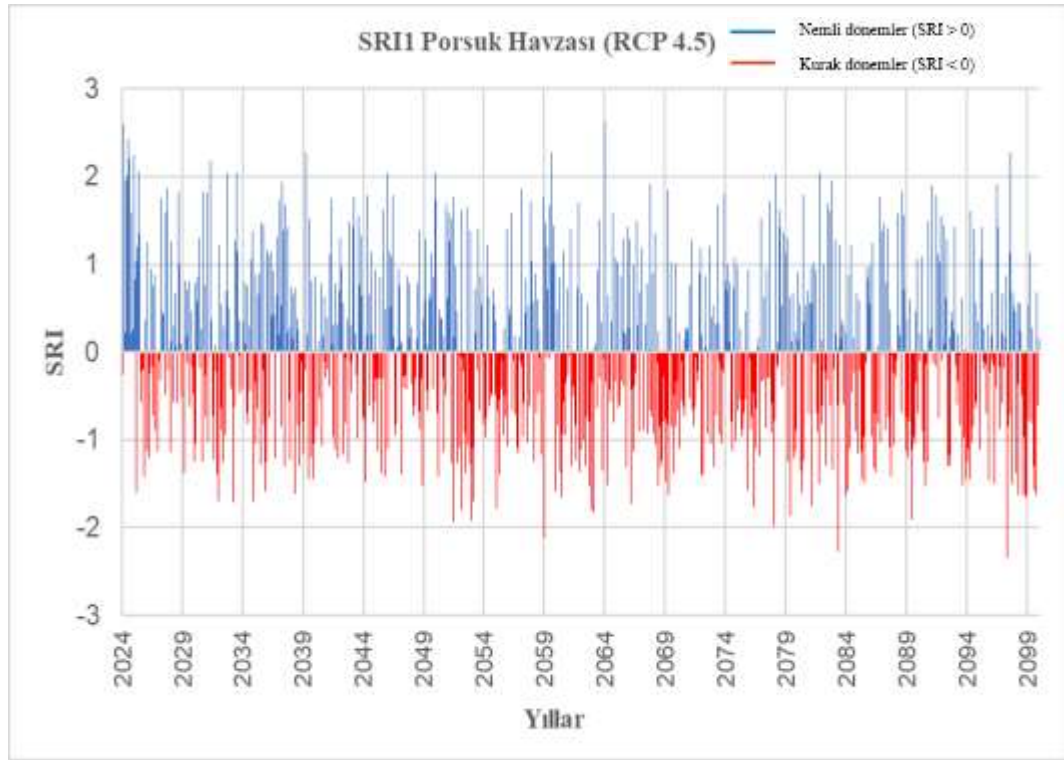
Şekil 4.25 2025-2100 Yılları arasındaki RCP 8.5 SPI12 sonuçları

Porsuk Havzası genelinde yıllık olarak analiz edilen SPI12 meteorolojik kuraklık indeksi sonuçlarının verildiği Şekil 4.25 incelendiğinde, özellikle 2060 yılından sonra tamamen kurak periyot içerisinde olabileceği öngörülmektedir. SPI12 risk değerlendirmesine göre ise 2024-2050 yılları arasında %25.6 orta şiddetli kurak, %3.57 şiddetli kurak ve %0 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %46.52 orta şiddetli kurak, %18.75 şiddetli kurak ve %0.34 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2075-2100 döneminde yapılan değerlendirmelerde, orta şiddette kuraklık %43.66, şiddetli kuraklık %22.33 ve çok şiddetli kuraklık %0.66 oranlarında gerçekleşmiştir.

SPI'nın meteorolojik kuraklık analizleri genel olarak değerlendirildiğinde, meteorolojik olarak şiddetli kuraklıkların süresinin ve şiddetinin 2099 yılına doğru arttığı görülmüştür. Özellikle 2060 yılından sonra neredeyse tamamen kurak bir periyot içerisinde oluşabileceği öngörülmektedir. Ayrıca, ani nemli periyotların da kararsız atmosfer tabakasından dolayı oluşabileceği ve bu durumun ani taşkın riskini de oluşturabilmektedir.

4.3.3 Porsuk havzası standart akış indeks (SRI) sonuçları (RCP 4.5)

İyimser senaryo grubu olan RCP 4.5'in sıcaklık ve yağış projeksiyonları HEC-HMS hidrolojik modelinde tanımlanarak geleceğe yönelik iyimser senaryo grubu altında akım projeksiyonlarının standart akım indeks sonuçları (1, 3, 6, 9 ve 12) aylık periyotlarda analiz edilmiştir.

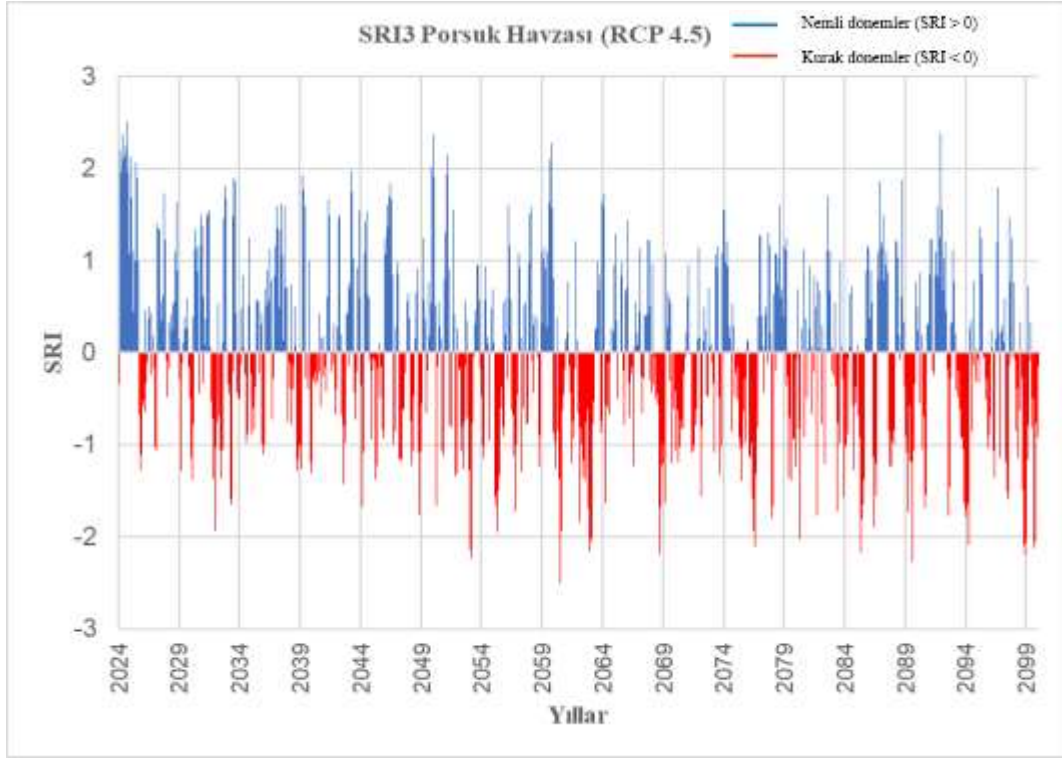


Şekil 4.26 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SRI1 sonuçları

Porsuk Havzası genelinde aylık olarak analiz edilen SRI1 hidrolojik kurak indeks sonuçlarının verildiği Şekil 4.26 incelendiğinde kuraklık şiddetinin nemlilik durumuna göre daha çok gerçekleştiği ve 2100 yılına doğru kuraklık şiddetinin ve sıklığının arttığını görebiliriz.

Şekil 4.25 incelendiğinde RCP 4.5 senaryo grubu altında SRI'nın aylık sonuçlarına bakıldığında, kuraklık risk değerlendirmesine göre 2024-2050 yılları arasında %41.9 orta şiddetli kurak, %14.28 şiddetli kurak ve %0.29 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir.

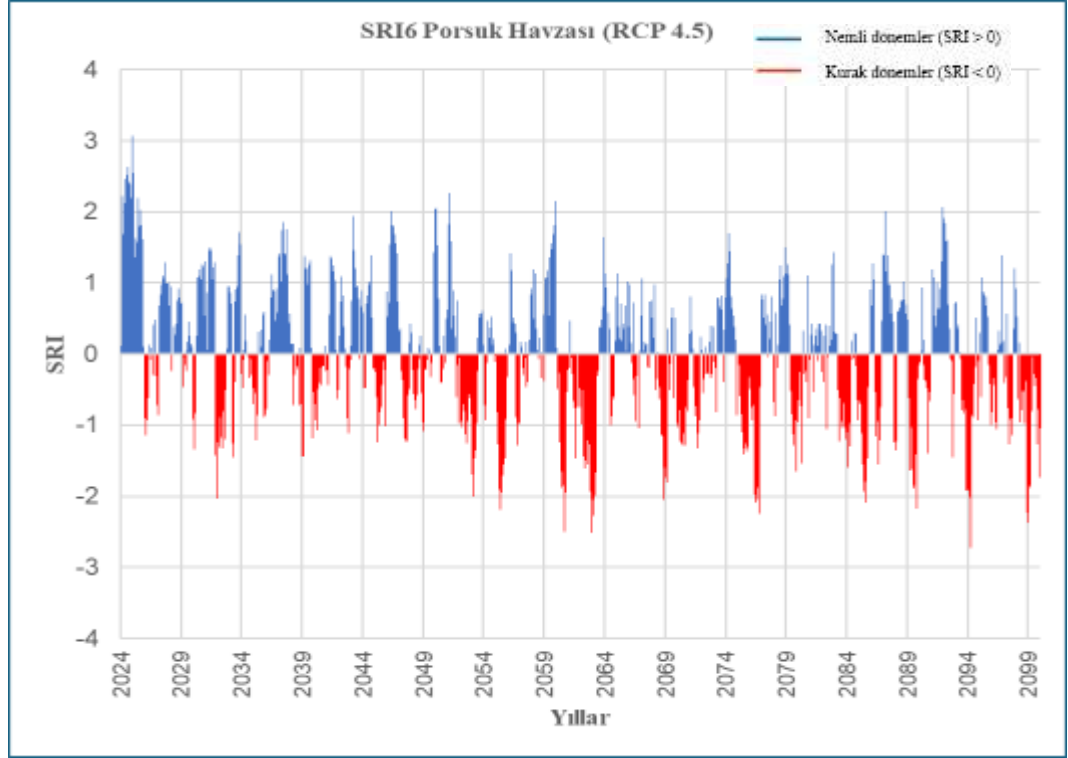
2050-2075 periyodunda ise %37.84 orta şiddetli kurak, %17.71 şiddetli kurak ve %0.34 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %33 orta şiddetli kurak, %19.66 şiddetli kurak ve %0.66 çok şiddetli kurak olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.27 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SRI3 sonuçları

Ocak-şubat-mart aylarının beraber ele alındığı SRI3 hidrolojik kuraklık analiz sonuçlarının verildiği Şekil 4.27 incelendiğinde kuraklık şiddetlerinin yıllara göre biraz daha netleştiği ve 2100 yılına doğru hidrolojik kuraklık şiddetinin arttığı görülebilmektedir.

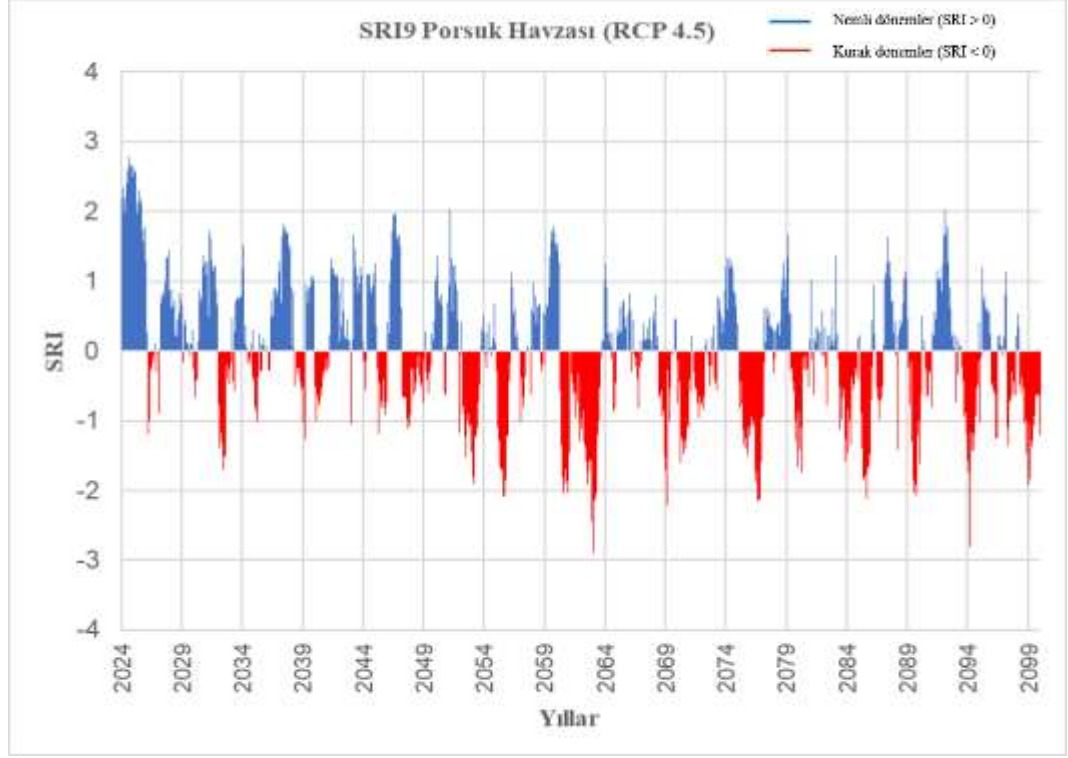
Diğer analizlerde olduğu gibi 2024-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. 2024-2050 yılları arasında %43.75 orta şiddetli kurak, %12.21 şiddetli kurak ve %0 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %36.45 orta şiddetli kurak, %15.27 şiddetli kurak ve %2.43 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %35.7 orta şiddetli kurak, %18.33 şiddetli kurak ve %3.33 çok şiddetli kurak olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.28 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SRI6 sonuçları

Şekil 4.28’de görüldüğü gibi RCP 4.5’in SRI6 sonuçları incelendiğinde, özellikle tahıl üretiminin gelişim periyodundaki en önemli periyot olan ocak-haziran aylarını kapsayan 6 aylık kuraklık analizleri, tarımsal açıdan kuraklık uyarısı verebilmektedir.

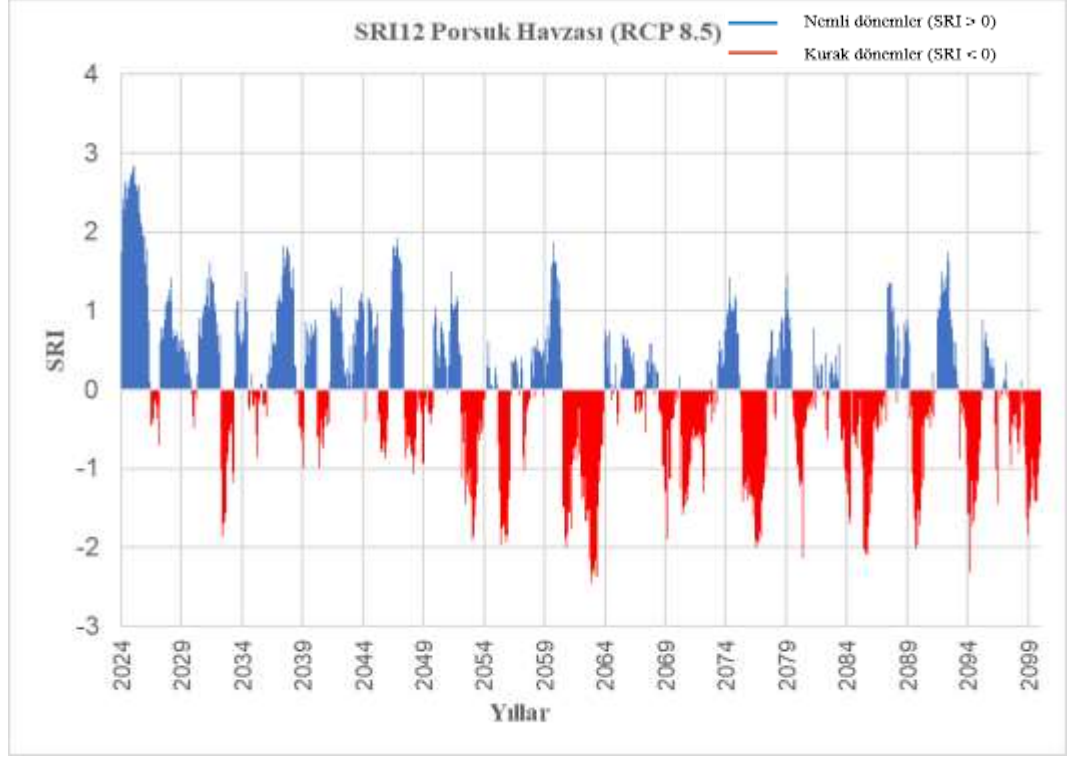
Porsuk Havzası genelindeki SRI6 analizlerinin Kuraklık risk değerlendirmesine göre 2024-2050 yılları arasında %52.38 orta şiddetli kurak, %7.14 şiddetli kurak ve %0.29 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %28.82 orta şiddetli kurak, %15.97 şiddetli kurak ve %2.77 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %22 orta şiddetli kurak, %17.7 şiddetli kurak ve %3.33 çok şiddetli kurak olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.29 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SRI9 sonuçları

Şekil 4.29'da sunulan RCP 4.5 senaryosuna ait SRI9 sonuçları incelendiğinde, Ocak-Eylül aylarını kapsayan 9 aylık kuraklık analizleri, hemen hemen tüm tarımsal üretimi etkileyebilecek şekilde sonuçlar üretmektedir.

Risk değerlendirmesine göre ise 2024-2050 yılları arasında 58.33 orta şiddetli kurak, %5.05 şiddetli kurak ve %0 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %23.61 orta şiddetli kurak, %18.41 şiddetli kurak ve %3.82 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %18 orta şiddetli kurak, %20.7 şiddetli kurak ve %2.7 çok şiddetli kurak olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.30 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SRI12 sonuçları

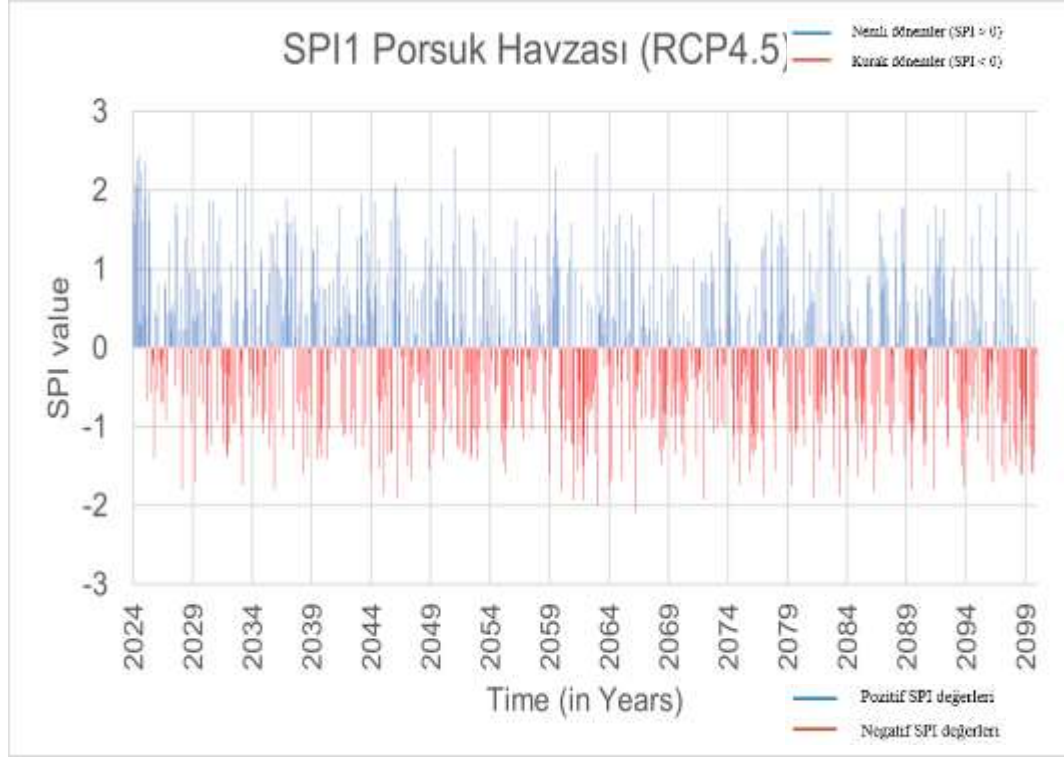
Porsuk Havzası genelinde yıllık olarak analiz edilen SRI12 hidrojik kuraklık indeks sonuçlarının verildiği Şekil Şekil 4.30 incelendiğinde, özellikle 2060 yılından sonra tamamen kurak periyot içerisinde olabileceği öngörülmektedir.

SRI12 risk değerlendirmesine göre ise 2024-2050 yılları arasında %29.76 orta şiddetli kurak, %2.38 şiddetli kurak ve %0 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. 2050-2075 periyodunda ise %33.3 orta şiddetli kurak, %20.13 şiddetli kurak ve %2.77 çok şiddetli kurak olarak belirlenmiştir. Son olarak 2075-2100 periyodunda ise %38 orta şiddetli kurak, %23 şiddetli kurak ve %2.66 çok şiddetli kurak olarak tespit edilmiştir.

SRI'nın hidrojik kuraklık analizleri genel olarak değerlendirildiğinde, 2024-2099 yılları 3 ayrı periyot (2024-2050, 2050-2075, 2075-2100) şeklinde analiz edilmiştir. Sonuç olarak hidrojik şiddetli ve çok şiddetli kuraklıkların 2100 yılına doğru arttığı ve orta şiddetli kuraklıkların ise azaldığı sonucuna varılmıştır.

4.3.4 Porsuk havzası standart yağış indeks (SPI) sonuçları (RCP4.5)

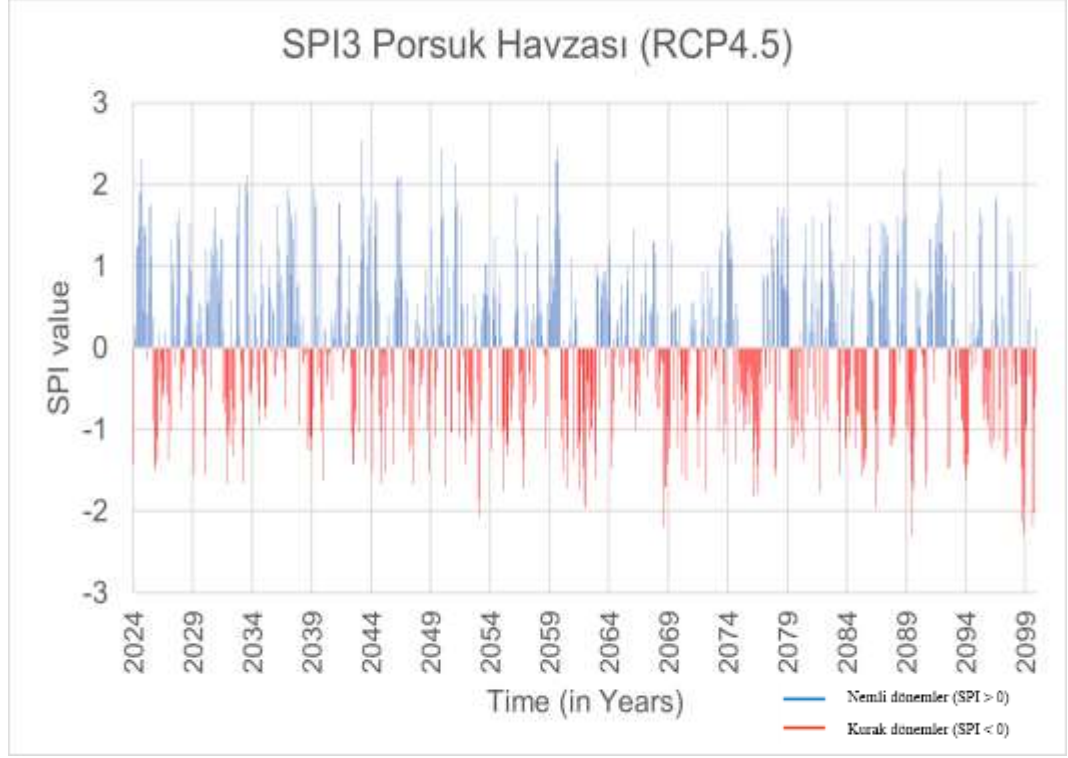
Meteorolojik kuraklık indeksinin belirlendiği SPI sonuçları iyimser senaryo olan RCP4.5'e göre 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık periyotlarda analiz edilmiştir.



Şekil 4.31 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SPI1 sonuçları

RCP 4.5'in SPI1 sonuçları incelendiğinde, 2024-2050 arasındaki periyotta çok şiddetli kuraklık görülmemiştir. Şiddetli kuraklık olasılığı %13.69 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı %46.13 olarak tespit edilmiştir. 2050-2075 yılları arasında ise orta şiddetli kuraklık olasılıklarının bir kısmı şiddetli kurak döneme girmiştir.

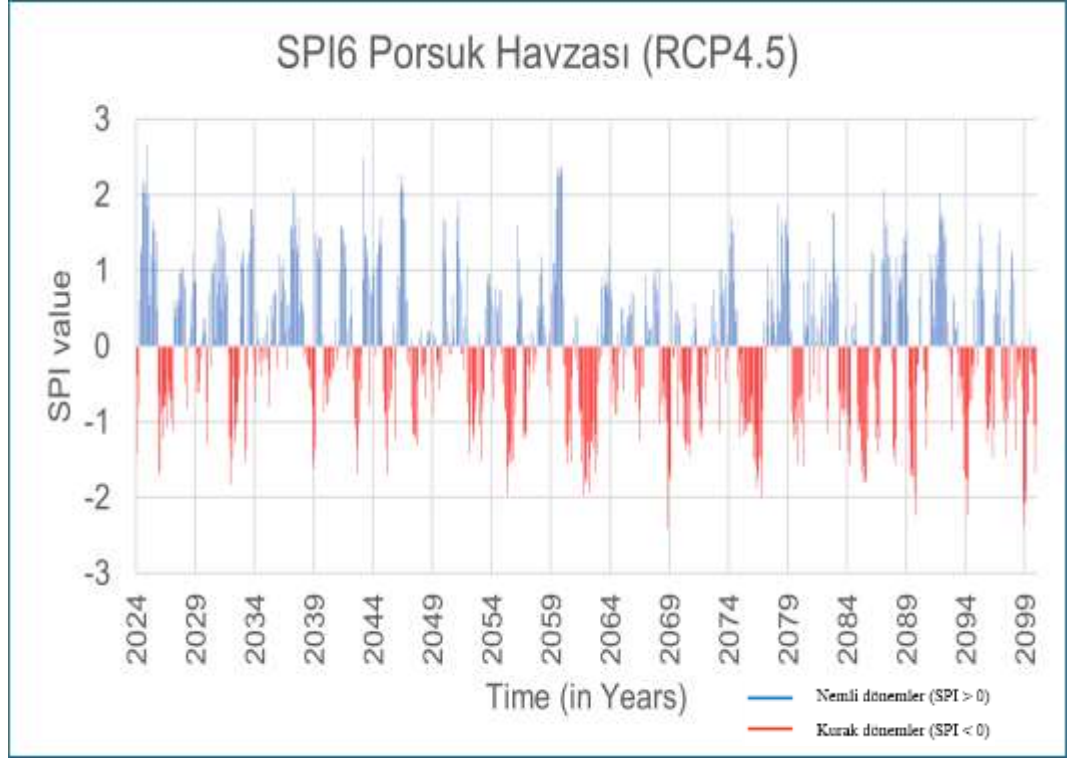
Bu periyotta ise çok şiddetli kuraklık olasılığı %0.69, şiddetli kuraklık olasılığı %18.40 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı ise %35.41'dir. Son periyot olan 2075-2099 döneminde ise orta şiddetli kuraklıklar şiddetli kurak döneme geçmeye devam etmiştir. Bu periyottaki çok şiddetli kuraklık görülmemiş olup şiddetli kuraklık olasılığı %19.66 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı ise %36.66 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.31).



Şekil 4.32 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SPI3 sonuçları

Şekil 4.32’de RCP 4.5’in SPI3 sonuçları incelendiğinde, 2024-2050 arasındaki periyotta çok şiddetli kuraklık olasılığı, %0.89, Şiddetli kuraklık olasılığı %13.09 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı %40.17 olarak tespit edilmiştir. 2050-2075 yılları arasında ise orta şiddetli kuraklık olasılıklarının bir kısmı şiddetli kurak döneme girmiştir.

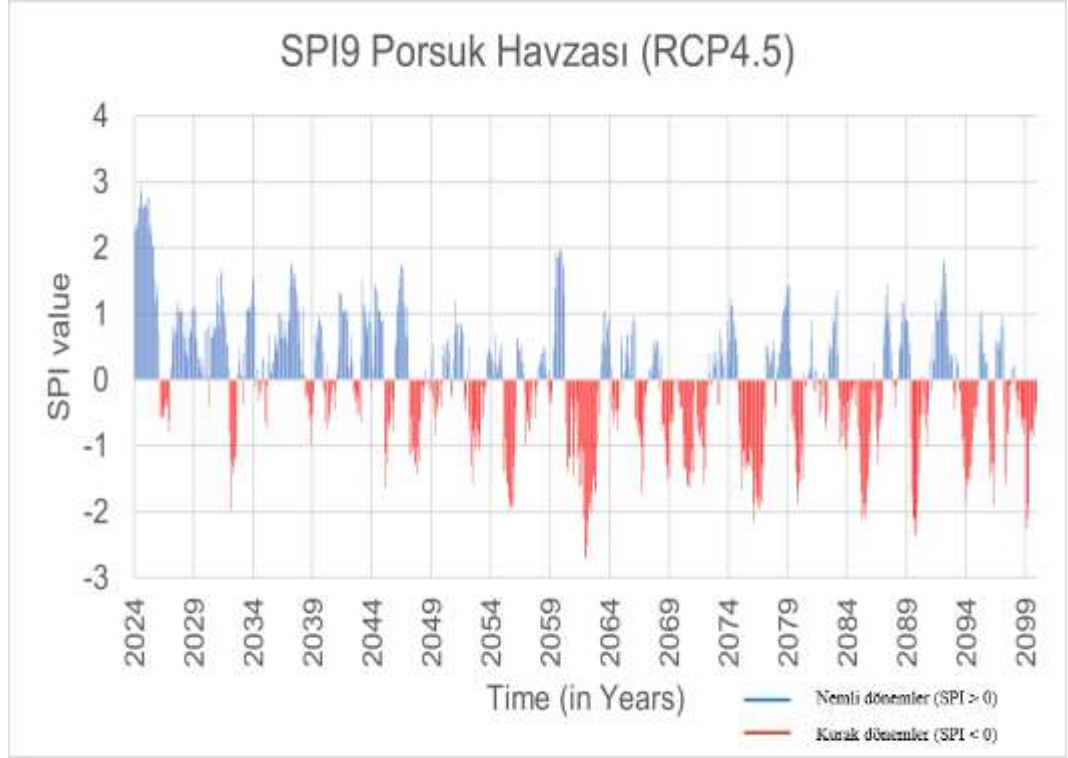
Bu periyotta ise çok şiddetli kuraklık olasılığı %0.70, şiddetli kuraklık olasılığı %18.05 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı ise %33.3’tür. Son periyot olan 2075-2099 döneminde ise orta şiddetli kuraklıklar şiddetli kurak döneme geçmeye devam etmiştir. Bu periyottaki çok şiddetli kuraklık olasılığı, %1.66 olup şiddetli kuraklık olasılığı %19 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı ise %32.33 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.33 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SPI6 sonuçları

RCP 4.5'in SPI6 sonuçları incelendiğinde, 2024-2050 arasındaki periyotta çok şiddetli kuraklık olasılığı, %0.91, Şiddetli kuraklık olasılığı %9.82 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı %40.17 olarak tespit edilmiştir. 2050-2075 yılları arasında ise orta şiddetli kuraklık olasılıklarının bir kısmı şiddetli kurak döneme girmiştir.

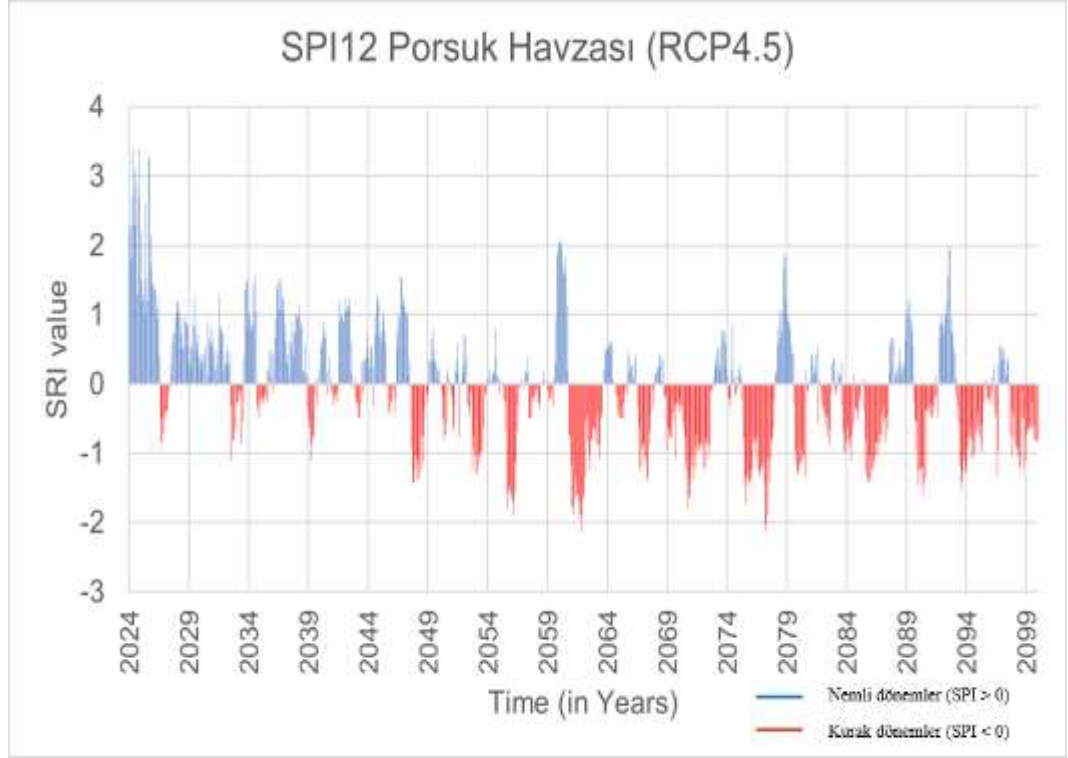
Bu periyotta ise çok şiddetli kuraklık olasılığı %0.34, şiddetli kuraklık olasılığı %19.09 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı ise %27.7'tür. Son periyot olan 2075-2099 döneminde ise orta şiddetli kuraklıklar şiddetli kurak döneme geçmeye devam etmiştir. Bu periyottaki çok şiddetli kuraklık olasılığı, %1.66 olup şiddetli kuraklık olasılığı %23.3 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı ise %21.3 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.33).



Şekil 4.34 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SPI9 sonuçları

Şekil 4.34'e bakıldığında RCP 4.5'in SPI9 sonuçları incelendiğinde, 2024-2050 arasındaki periyotta çok şiddetli kuraklık görülmemiştir. Şiddetli kuraklık olasılığı %5.35 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı %62.20 olarak tespit edilmiştir. 2050-2075 yılları arasında ise orta şiddetli kuraklık olasılıklarının bir kısmı şiddetli kurak döneme girmiştir.

Bu periyotta ise çok şiddetli kuraklık olasılığı %2.08, şiddetli kuraklık olasılığı %18.41 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı ise %22.2'tür. Son periyot olan 2075-2099 döneminde ise orta şiddetli kuraklıklar şiddetli kurak döneme geçmeye devam etmiştir. Bu periyottaki çok şiddetli kuraklık olasılığı, %3.66 olup şiddetli kuraklık olasılığı %19.6 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı ise %15.6 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.35 2024-2100 Yılları arasındaki RCP 4.5 SPI12 sonuçları

RCP 4.5'in SPI12 sonuçları incelendiğinde, 2024-2050 arasındaki periyotta çok şiddetli kuraklık görülmemiştir. Yapılan analizler sonucunda, şiddetli kuraklık olasılığı %3.57, orta şiddetli kuraklık olasılığı ise %25.59 olarak ortaya konmuştur. 2050-2075 yılları arasında ise orta şiddetli kuraklık olasılıklarının bir kısmı şiddetli kurak döneme girmiştir.

Bu periyotta ise çok şiddetli kuraklık olasılığı %0.34, şiddetli kuraklık olasılığı %18.75 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı ise %46.52'tür. Son periyot olan 2075-2099 döneminde ise orta şiddetli kuraklıklar şiddetli kurak döneme geçmeye devam etmiştir. Bu periyottaki çok şiddetli kuraklık olasılığı, %0.66 olup şiddetli kuraklık olasılığı %22.33 ve orta şiddetli kuraklık olasılığı ise %43.66 olarak belirlenmiştir (Şekil 4.35).

Porsuk Havzasını genel olarak değerlendirdiğimizde gerek hidrolojik kuraklığı simgeleyen SRI, gerekse de meteorolojik kuraklığı simgeleyen SPI'nın gelecek süreç içerisinde kuraklık şiddetlerinin giderek artacağı analiz sonuçlarına göre tespit edilmiştir. Aylık ve 3 aylık periyotlardaki kuraklık şiddetleri, anlık olarak değişen meteorolojik aktivitelerden hızlı bir şekilde etkilenebileceği kuraklık indeks sonuçlarının verildiği

indekslerden de anlaşılmaktadır. Bu sebeple, Porsuk Havzasının tarımsal sulama dönemini temsil eden Haziran-Eylül ayları arasındaki periyot 6-9 aylık kuraklık şiddetlerini simgelemektedir. Kuraklık indekslerinin, 2024-2050, 2050-2075 ve 2075-2099 dönemlerinin 6-9 aylık periyottaki kuraklık riskleri iyimser ve kötümser senaryo grupları altında ayrı ayrı Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 2024-2100 yılları arasındaki RCP4.5 -RCP8.5 senaryolarının 6-9 Aylık SPI ve SRI kuraklık risk değerleri (%)

İndeks	Orta Şiddetli	Şiddetli	Çok Şiddetli
RCP 4.5 İyimser Senaryo (2024-2050)			
SPI	51.18	7.58	0.45
SRI	55.35	6.1	0.15
RCP 8.5 Kötümser Senaryo (2024-2050)			
SPI	59.37	3.56	1.29
SRI	56.30	5.65	0.89
RCP 4.5 İyimser Senaryo (2050-2075)			
SPI	24.95	18.75	1.21
SRI	26.21	17.19	3.29
RCP 8.5 Kötümser Senaryo (2050-2075)			
SPI	19.61	18.40	0.70
SRI	28.47	17.35	2.77
RCP 4.5 İyimser Senaryo (2075-2100)			
SPI	18.45	21.45	2.66
SRI	21.30	19.20	3.01
RCP 8.5 Kötümser Senaryo (2075-2100)			
SPI	14.35	19.5	5.01
SRI	16.81	23.5	1.33

İklim senaryoları altında, Porsuk Havzası genelindeki kuraklık risk değerleri incelendiğinde özellikle 2075-2100 periyodundaki kuraklık şiddetlerinin diğer periyotlara göre daha fazla olabileceği öngörülmektedir. Meteorolojik ve hidrolojik kuraklık riskleri dönemlere göre birbirine yakın değerler vermektedir. Ayrıca, kötümser

senaryonun sonuçlarının çok şiddetli kuraklık risk değerlerinde etkisini gösterdiği de anlaşılmaktadır.

Porsuk Havzası genelini, 2024-2100 yılları arasını genel olarak değerlendirirsek, hidrolojik olarak %14.83 meteorolojik olarak ise %14.8 şiddetli kuraklığın görülebileceği öngörülmekte olup çok şiddetli kuraklık açısından hidrolojik olarak %1.91 meteorolojik olarak da %1.61 olasılığında öngörülmektedir. Daha açık bir ifadeyle her 5 yılda bir şiddetli kuraklık 50 yılda bir de çok şiddetli kuraklık olabileceği tespit edilmiştir. Bahsi geçen çok şiddetli kuraklık ülkemizde 2007-2008 yılları arasında yaşanmış olup üreticilerimizin 2 milyar dolar kaybı olmuştur.

Buraya kadar yapılan kuraklık tespitleri, havzanın genelinde elde edilen iklim verilerinin ortalamaları esas alınarak değerlendirilmiştir. Ancak kuraklığın Porsuk Havzası'ndaki mikro ölçekteki etkilerini ve özellikle sulanan ile sulanmayan alanlarda yaratabileceği farklılıkları doğru biçimde ortaya koyabilmek için ayrıntılı kuraklık risk haritalarının hazırlanması büyük önem taşımaktadır. Bu amaçla, havzanın farklı kesimleri ayrı ayrı ele alınarak grid bazında kuraklık risk değerleri hesaplanmıştır. Her bir gridin kuraklık risk değerleri, hidrolojik ve meteorolojik kuraklık açısından tespit edilerek birleştirilmiş ve 6-9 aylık periyotlardaki kuraklık risk haritaları 2024-2050, 2050-2075 ve 2075-2100 dönemleri için ayrı ayrı oluşturulmuştur.

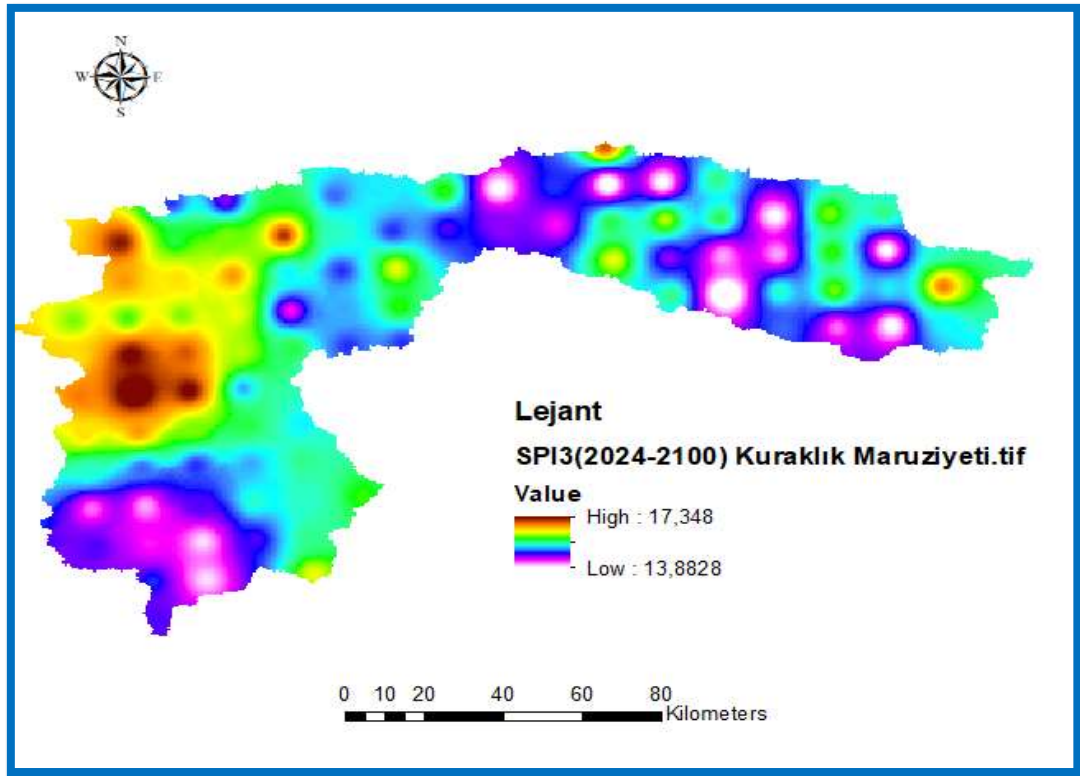
4.4 Porsuk Havzası Kuraklık Maruziyeti Haritaları

Bu çalışmada, meteorolojik ve hidrolojik kuraklık riskine yönelik haritalar oluşturulmuştur. Söz konusu risk haritaları, 2024-2100 yılları arasındaki kuraklık şiddet değerleri baz alınarak tarımsal üretimi ve havza genelindeki su kaynaklarını doğrudan etkileyebilecek şiddetli kuraklık sınıfına göre 3, 6 ve 9 aylık periyotlarda hazırlanmıştır. Havzada yaygın biçimde yetiştirilen arpa, ayçiçeği, biber, domates, salatalık, kabak, marul, mısır, nohut, soğan, pancar, yonca ve yulaf gibi ürünler; sulama ihtiyaçlarına göre 'yağışa bağımlı' ve 'sulanabilir' olmak üzere sınıflandırılmış ve bu bitkilerin kuraklık riskine maruziyeti, fenolojik gelişim evreleri dikkate alınarak ilgili kuraklık türlerine göre (meteorolojik veya hidrolojik) değerlendirilmiştir.

4.4.1 Meteorolojik kuraklık maruziyeti haritaları

Meteorolojik kuraklık risk haritaları, Porsuk Havzası genelindeki her bir iklim gridinin yağış projeksiyon verileri kullanılarak SPI'nin sonuçlarına göre geleceğe yönelik 3, 6, 9 aylık periyotlarda şiddetli kuraklık sınıfını içerecek şekilde 10km x 10km çözünürlüğünde oluşturulmuştur.

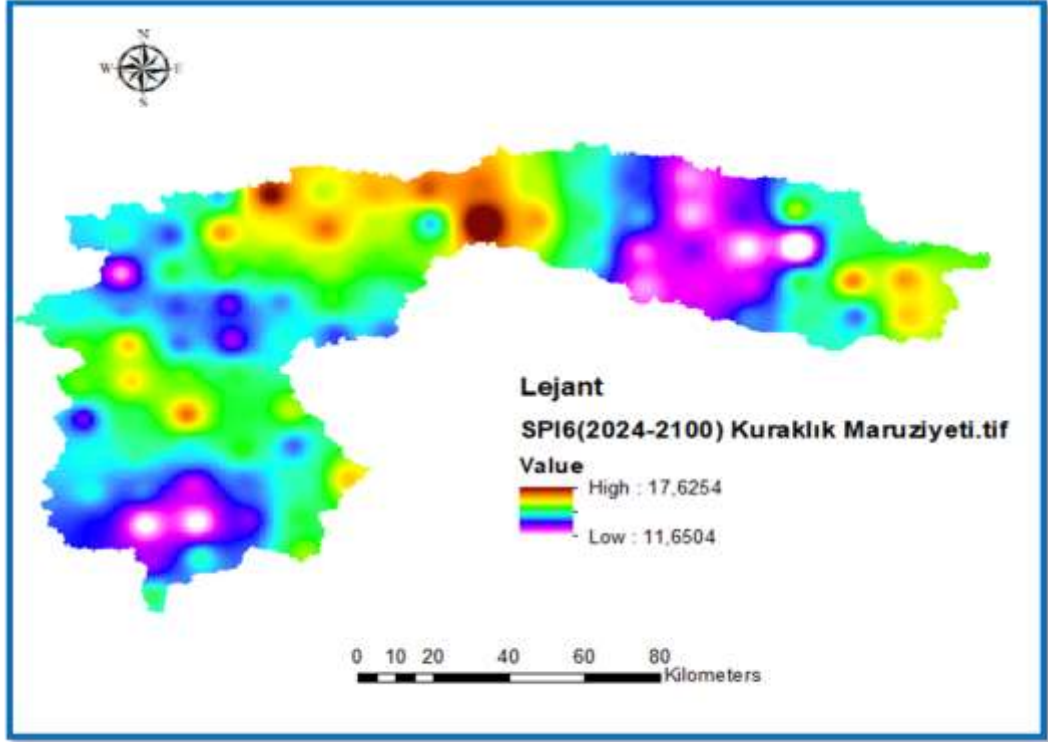
Ocak, Şubat ve Mart aylarını kapsayacak şekilde hesaplanan 3 aylık meteorolojik kuraklık maruziyeti haritası Şekil 4.36'da verilmiştir.



Şekil 4.36 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki SPI3 kuraklık maruziyeti haritası

Üç aylık (Ocak, Şubat, Mart) meteorolojik kuraklık maruziyeti haritası incelendiğinde, bölgedeki kuraklık risk oranlarının %13.88 ile %17.34 aralığında değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Haritanın oluşturulmasında kullanılan zaman periyodunun 75 yıl olduğu düşünülürse, her 4-6 yılda bir Ocak, Şubat ve Mart aylarını kapsayan 3 aylık periyotta şiddetli meteorolojik kuraklığın görülebileceği sonucu çıkarılabilir.

Ocak ayından itibaren Haziran ayına kadarki periyodu kapsayan 6 aylık şiddetli meteorolojik kuraklık risk haritası da Şekil 4.37’de verilmiştir.

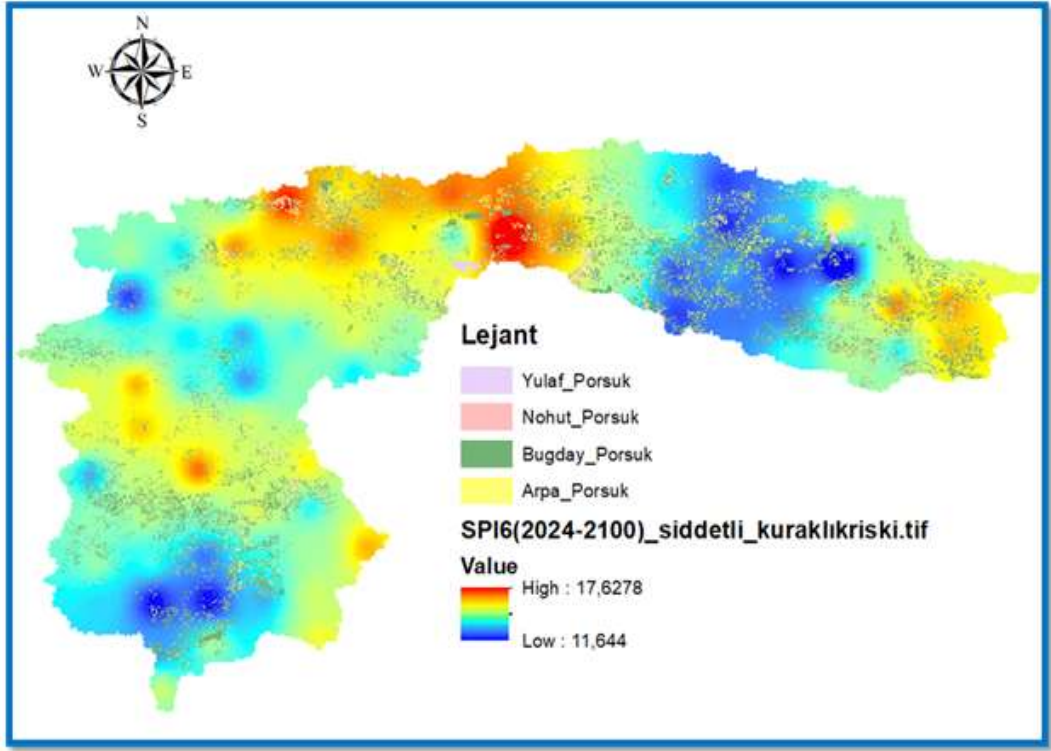


Şekil 4.37 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki SPI6 kuraklık maruziyeti haritası

6 aylık peritotta şiddetli meteorolojik kuraklık maruziyeti haritası incelendiğinde ise kuraklık riskini simgeleyen lejant aralığının 3 aylık periyoda göre biraz daha arttığı görülmektedir. Riski yüksek olan bölgelerde her 4 yılda bir şiddetli meteorolojik kuraklık beklenirken riski düşük bölgelerde, 6-7 yılda bir şiddetli meteorolojik kuraklık riski taşıdığı söylenebilir (Şekil 4.36).

Ocak-Haziran periyodunu kapsayan 6 aylık şiddetli meteorolojik kuraklık riski kapsadığı zaman periyodu açısından yağışa ya da kar erimelerine en çok maruz kalınan periyottur. Bu sebeple, yaygın olarak yağışa dayalı üretimi yapılan arpa, buğday, yulaf ve nohut bitkilerinin gelişimini ve ürün verimini doğrudan etkileyebilecektir.

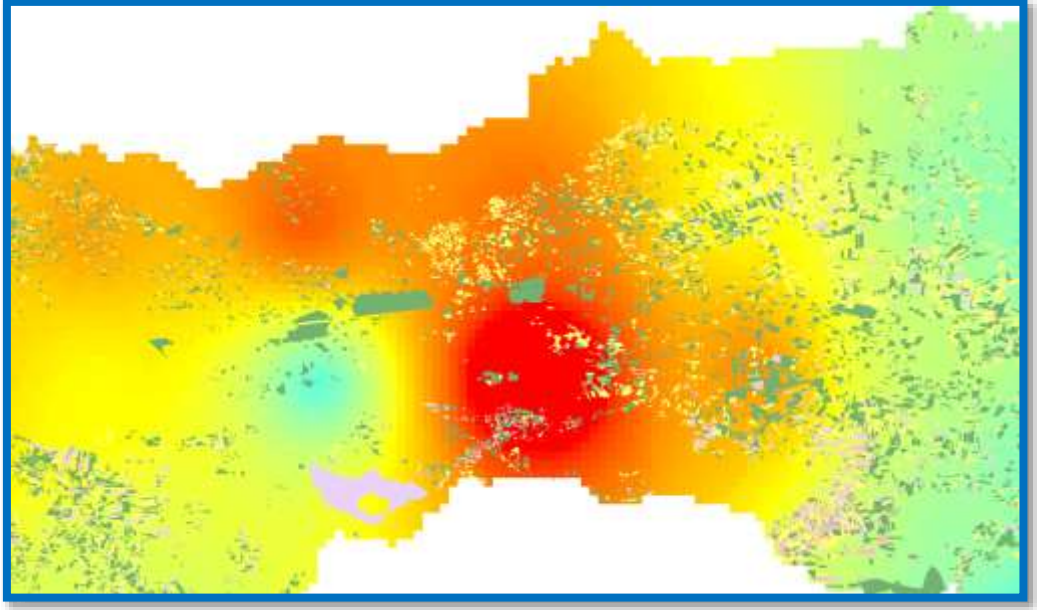
Şekil 4.37’te Porsuk Havzası genelinde yağışa dayalı üretimi yapılan ürünler ve SPI6 şiddetli kuraklık maruziyeti haritası birlikte gösterilmiştir.



Şekil 4.38 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SPI6 kuraklık maruziyeti ve yağışa bağlı yetiştirilen ürün haritası

Şekil 4.38’de şiddetli meteorolojik riskini gösteren SPI6 maruziyeti haritası incelendiğinde en riskli bölgenin Eskişehir İlinin Tepebaşı ve Odunpazarı ilçelerine ait olduğu görülmektedir.

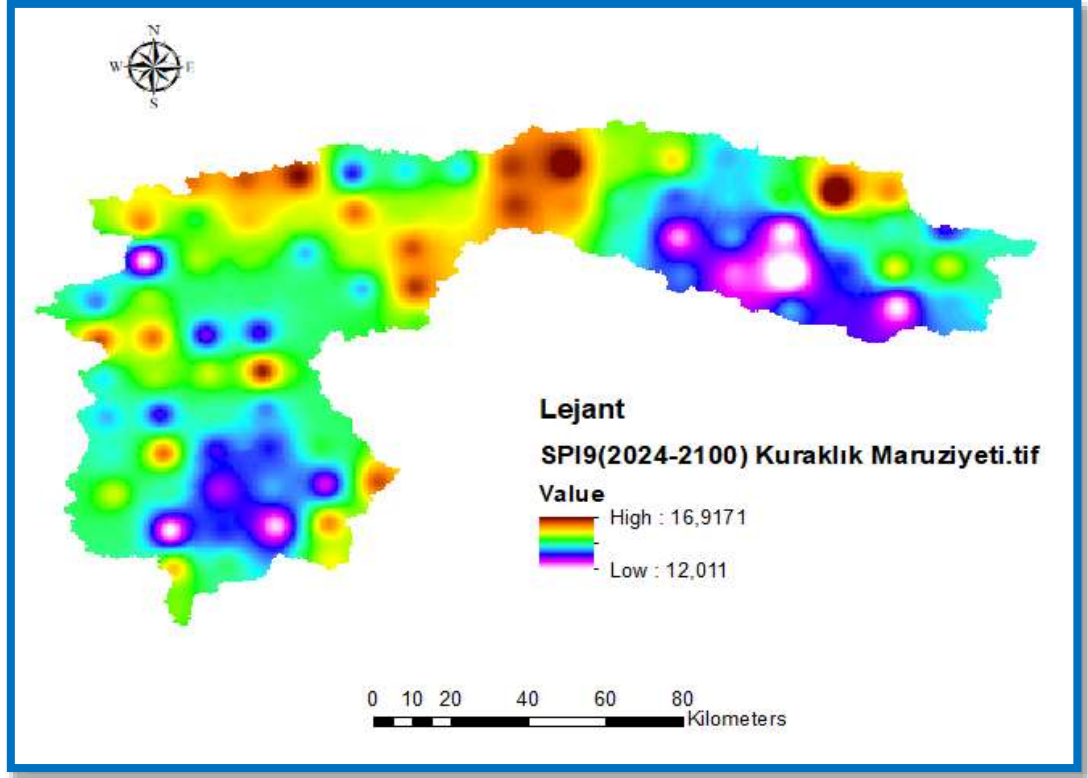
Şekil 4.39, Şekil 4.38’deki geniş alanın Tepebaşı ve Odunpazarı bölümünü ayrıntılı olarak gösteren bir kesiti sunmaktadır.



Şekil 4.39 Porsuk Havzasının Tepebaşı ve Odunpazarı İlçelerini kapsayan bölgede 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SPI6 kuraklık maruziyeti ve yağışa bağlı yetiştirilen ürün haritası

Şekil 4.39 incelendiğinde şiddetli SPI6 risk haritasının en riskli bölgede yetiştirilen ürünlerin yoğun olarak arpa, buğday ve nohut olarak yetiştirildiği görülmektedir. Bu bölgede, yağışa dayalı yetiştirilen ürünlerin, 4-5 yılda bir şiddetli kuraklık riski altında oluğu söylenebilir.

Ocak-Eylül dönemini kapsayan şiddetli SPI9 kuraklık risk haritası Şekil 4.40'da verilmiştir.



Şekil 4.40 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SPI9 kuraklık maruziyeti haritası

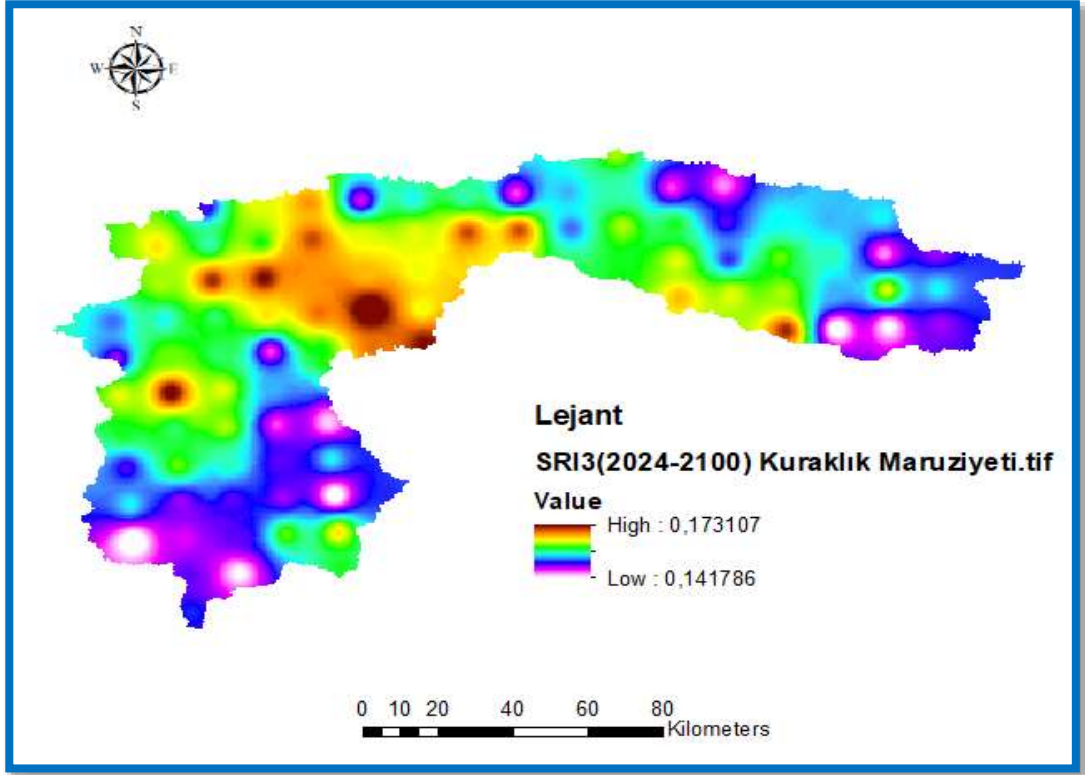
Ocak-Eylül aylarını içeren zaman periyodundaki şiddetli meteorolojik kuraklık riskini gösteren Şekil 4.39 incelendiğinde, SPI6’da olduğu gibi en riskli bölgenin Eskişehir İline ait Tepebaşı ve Odunpazarı ilçeleri olduğu görülmektedir. Bu bölgede yoğun olarak üretimi yapılan arpa, buğday ve nohut ürünlerinin 4-5 yılda bir şiddetli kuraklığa maruz kalabileceği ve ürün verimlerini doğrudan etkileyebileceği söylenebilir.

4.4.2 Hidrolojik kuraklık maruziyeti haritaları

Hidrolojik kuraklık risk haritalarını oluştururken meteorolojik kuraklıkta olduğu gibi kuraklık şiddet aralıklarına göre maruziyeti değerleri belirlenmiştir. Orta, şiddetli ve çok şiddetli olarak 3 farklı sınıfa ayrılan kuraklık şiddet göstergeleri içerisinde sadece şiddetli kurak analizleri yürütülmüştür. Çünkü orta şiddetli kuraklıklar neredeyse her yıl oluşabilmektedir. Çok şiddetli kurak dönemlerde 50-100 yılda bir oluştuğu için şiddetli kuraklık analizleri gerçek zaman periyodundaki olumsuz durumlara daha yakın sonuçlar

verebilmektedir. Bu sebeple, meteorolojik ve hidrolojik kuraklık risk haritaları şiddetli kuraklık analizleri sonucu üretilmiştir.

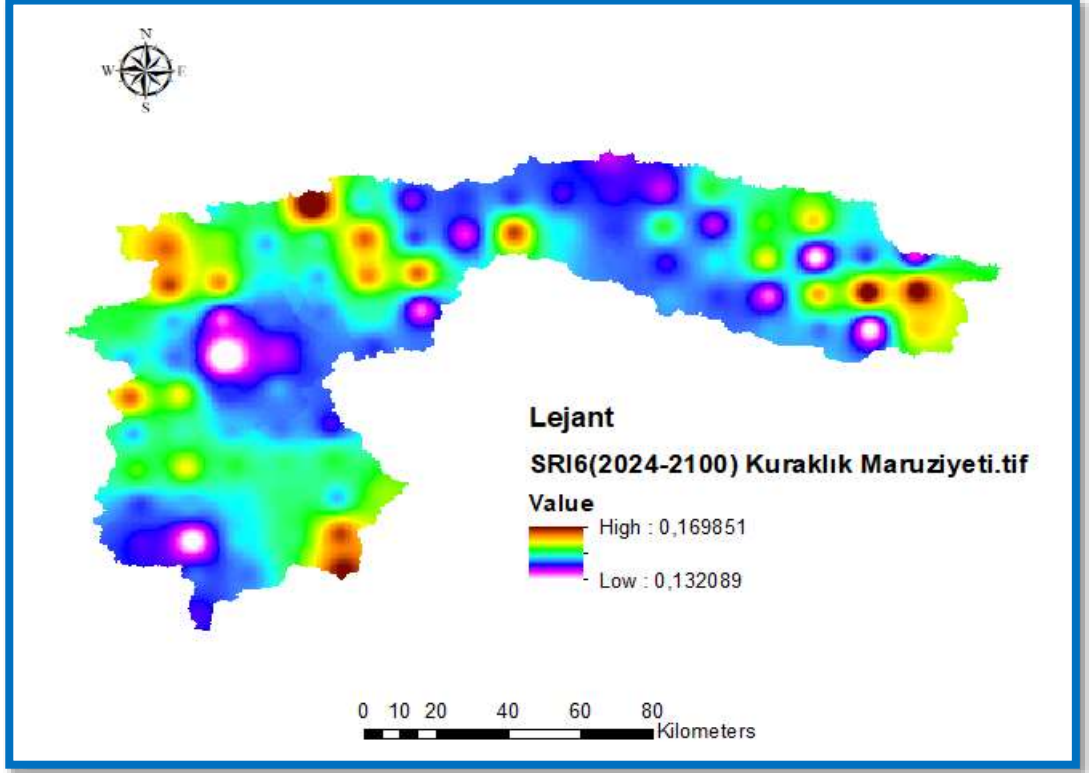
Hidrolojik kuraklık analizlerindeki geleceğe yönelik akım verileri, kalibrasyonu ve validasyonu tamamlanmış HEC-HMS modeli ile üretilmiştir. 2024-2100 yılları arasından projekte edilen akım verileri SRI kuraklık indeksine göre hidrolojik kuraklık şiddetleri belirlenmiş olup hidrolojik kuraklık risk analizleri üretilmiştir. Meteorolojik kuraklık risk analizlerinde olduğu gibi hidrolojik kuraklık analizleri de 3, 6, 9 aylık periyotta oluşturulmuştur. Ocak-Mart dönemini kapsayan 3 aylık şiddetli hidrolojik kuraklık risk haritası Şekil 4.41’de gösterilmiştir.



Şekil 4.41 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SRI3 kuraklık maruziyeti ve yağışa bağlı yetiştirilen ürün haritası

3 aylık periyotta şiddetli hidrolojik kuraklık riskini gösteren Şekil 4.37 incelendiğinde, Eskişehir İlinin Odunpazarı ilçesinin ve Kütahya İlinin daha riskli bölgelerde olduğu görülmektedir. Hidrolojik kuraklığın sulanan tarım parsellerine ve Havza içerisinde etkili

su kaynaklarına etkisinin daha net analizi için 6 aylık periyottaki şiddetli hidrolojik kuraklık risk haritası (Şekil 4.42) kullanılmıştır.

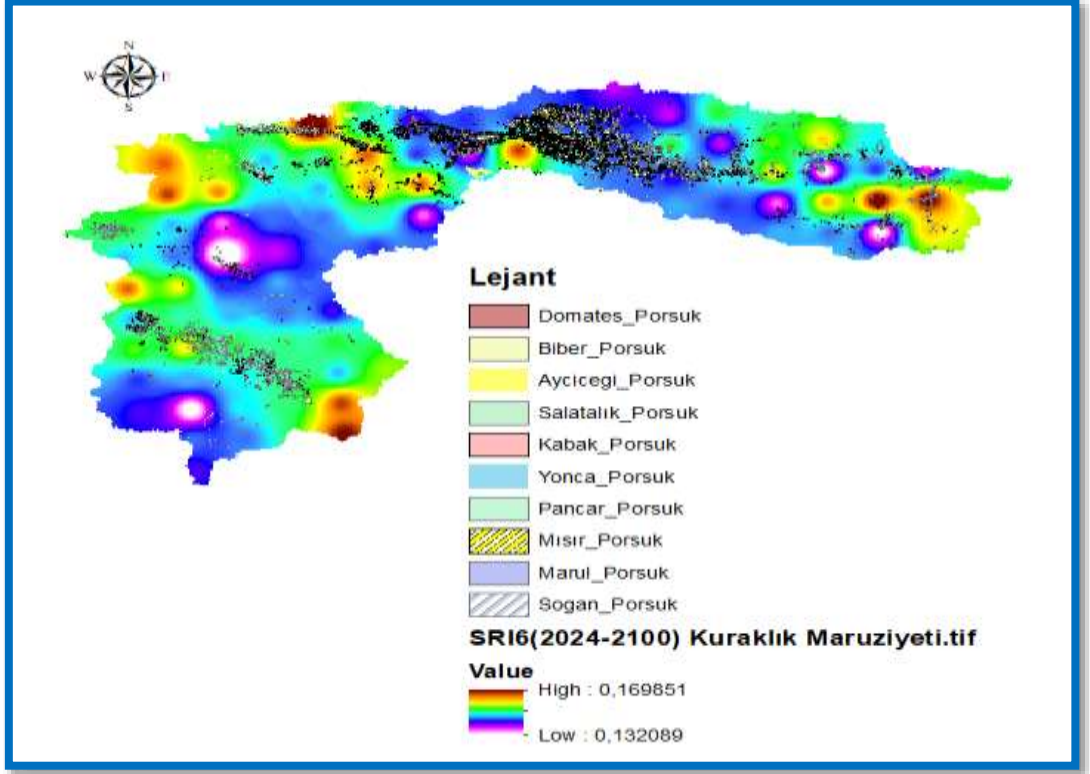


Şekil 4.42 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SRI6 kuraklık maruziyeti haritası

Şekil 4.42 incelendiğinde, Kütahya İlinin Baklan ve Bekili ilçelerindeki hidrolojik kuraklık riskinin diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Risk değerleri incelendiğinde, bölgenin 4 yılda bir şiddetli hidrolojik kuraklık riski altında olabileceği anlaşılmaktadır.

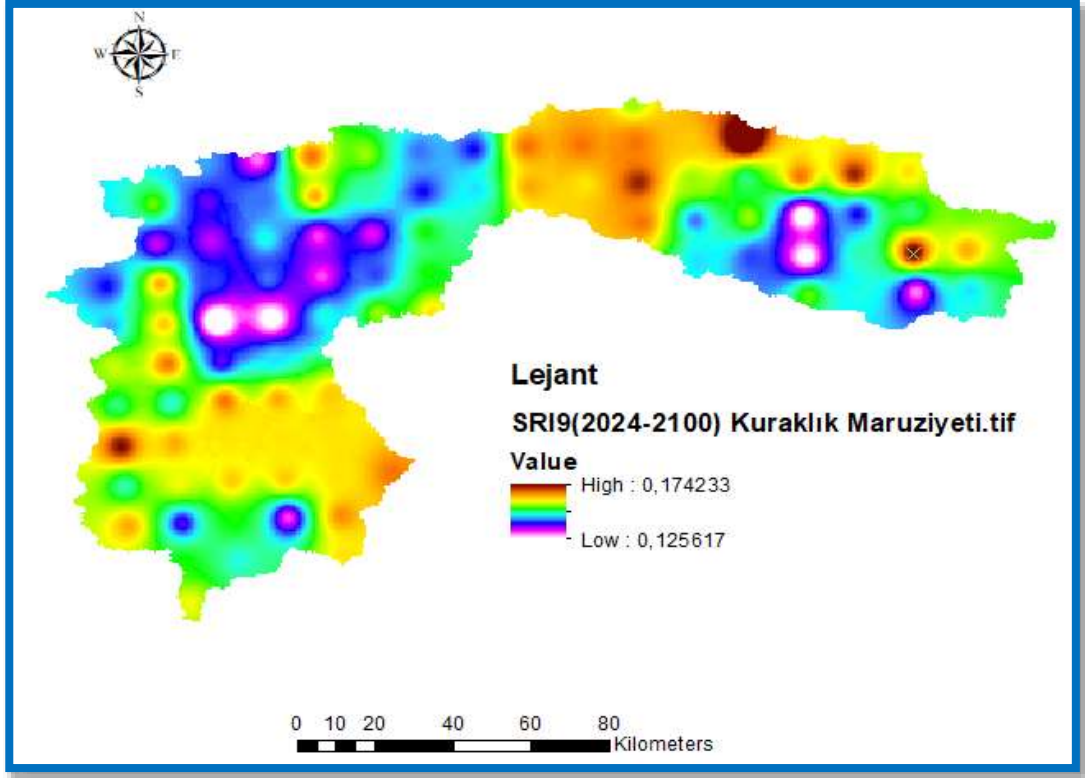
Hidrolojik kuraklık direkt olarak su depolama yapılarını dere akımlarını ve dolayısıyla sulanan tarım parsellerini etkilediği için Ocak-Haziran aylarını içeren şiddetli kuraklık analizi, sulanan bitkiler için gerekli sulama zaman periyodunu tam olarak kapsamaktadır. Bölgede yoğun olarak sulanan ürünlere baktığımızda; ayçiçeği, biber, domates, salatalık, kabak, marul, mısır, soğan, pancar ve yonca ürünleri dikkat çekmektedir. Bu ürünlerde genel olarak Nisan-Mayıs gibi ekilip Ağustos-Eylül gibi hasat edilmektedir. Dolayısıyla,

SRI6 ve SRI9'un risk analizleri sulanan tarım alanlarına etkisi açısından önemlidir. Şekil 4.43'de şiddetli SRI6 risk haritası ve sulanan tarım ürünleri gösterilmiştir.



Şekil 4.43 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SRI6 kuraklık maruziyeti ve yağışa bağlı yetiştirilen ürün haritası

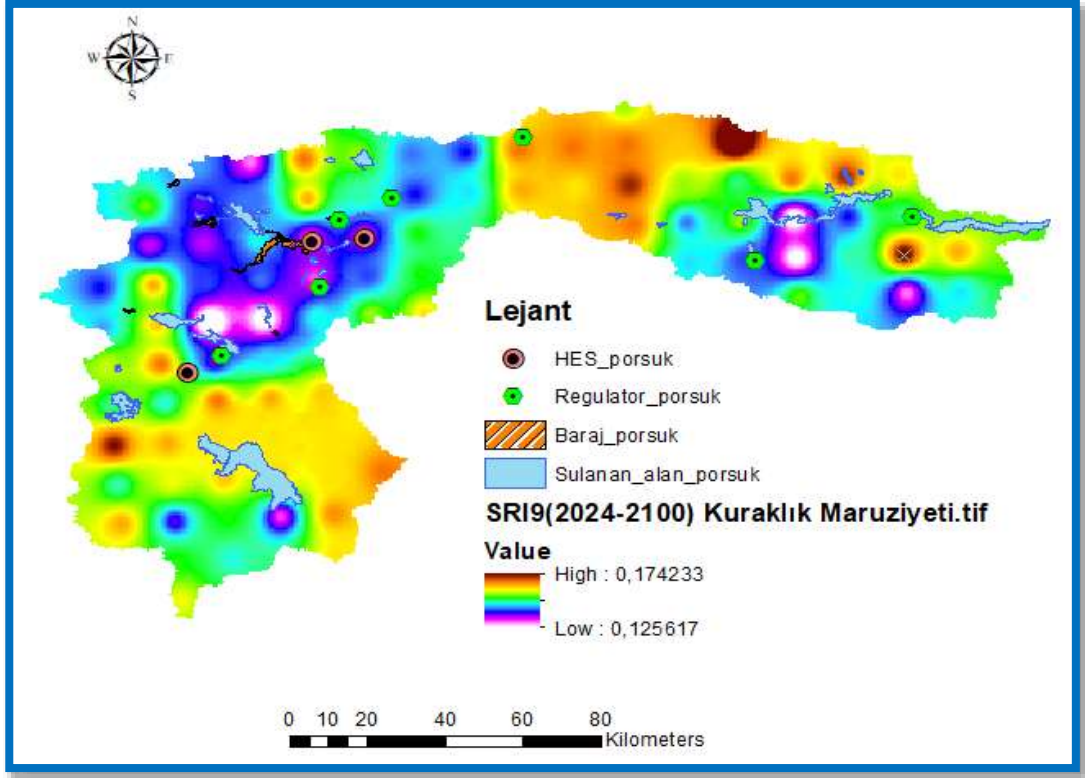
Şekil 4.43 incelendiğinde havzada yoğun olarak sulanan tarım parsellerinde mısır ve pancar üretiminin fazla olduğu görülebilir. En riskli bölge olan Eskişehir İlinin Sivrihisar ilçesinin kuzeyinde ve Odunpazarı ilçesinde oluştuğu görülmektedir. Kuraklık maruziyetinin yüksek olduğu bölgelerde, yonca, soğan ve marul ürünlerinin yoğun olarak ekildiği görülmektedir. Sulanan alanları, sulama yapılarını ve sulanan tüm bitkileri doğrudan etkileyebilecek olan 9 aylık şiddetli hidrolojik kuraklık risk haritası Şekil 4.44'de verilmiştir.



Şekil 4.44 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SRI9 kuraklık maruziyeti haritası

9 aylık (Ocak - Eylül) şiddetli hidrolojik kuraklık maruziyeti haritası incelendiğinde Eskişehir İlinin Alpu ilçesi ile Kütayha İlinin Aslanapa ilçeleri en riskli durumdadır. Bu bölgede, 6 aylık zaman periyodunda olduğu gibi ortalama 4-6 yılda bir şiddetli hidrolojik kuraklık riski bulunmaktadır.

Bölgede yer alan sulama yapıları açısından durum analiz edildiğinde havzada yer alan Baraj, HES, Sulanan alan, Regulator yapıları ve şiddetli SRI9 risk haritası Şekil 4.45’de gösterilmiştir.



Şekil 4.45 Porsuk Havzası 2024-2100 yılları arasındaki şiddetli SRI9 kuraklık maruziyeti ve havza içerisindeki sulama yapıları

Şekil 4.45 incelendiğinde Eskişehir İlinin Alpu ilçesinde yer alan Beylik Göleti Sulaması ve Yayıklı Göleti Sulamalarının en riskli alanlar olduğu görülmektedir. Ayrıca, Kütahya İlinin Aslanapa ve Altıntaş ilçelerinde yer alan Kureyşler Barajı Sulaması ile Beşkarış Barajı Sulamalarının riskinin yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Regülatörlerin durumuna bakıldığında Eskişehir'in Odunpazarı ilçesinde yer alan Gündüzler Regülatörünün şiddetli kuraklık riskinin diğer regülatörlere göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. HES'ler değerlendirildiğinde ise Havza genelinde 4 farklı büyük HES yer almakta olup en riskli HES'in Kütahya'da yer alan Gelinkaya HES olduğu görülmektedir. Meteorolojik ve hidrolojik kuraklık analizleri sonucunda, en kritik periyot olan 6-9 aylık şiddetli kuraklık sonuçlarına göre en riskli bölgenin Eskişehir İline bağlı Alpu ilçesi olduğu sonucuna varılmıştır. Alpu ilçesi Havza genelinde, sulanan tarımsal üretimin en yoğun olduğu bölgelerden biridir. Bölgede yoğun olarak yetiştirilen ayçiçeği, domates, yonca, pancar, mısır ürünlerinin kuraklık riskinin diğer bölgelere göre daha yüksek olduğu söylenebilir.

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE ÖNERİLER

5.1 Araştırma Sonuçları

İklim projeksiyonlarının modelde uygulanmasıyla elde edilen akım eğilimleri, hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryolarında uzun vadede düşüş yönünde belirgin bir eğilim ortaya koymuştur. Orta emisyon senaryosunda yaklaşık %17'ye ulaşan azalış, yüksek emisyon koşullarında %23'lere varan bir kayba dönüşmektedir. Bu sonuç, havzanın gelecekte su üretme kapasitesinin zayıflayabileceğini ve özellikle yaz dönemlerinde yüzey akışın daha sınırlı hâle gelebileceğini işaret etmektedir. Akım paternlerinde gözlenen bu değişim hem tarımsal sulama ihtiyacı hem de su kaynaklarının planlanması açısından kritik bir kırılganlık alanı yaratmaktadır.

Kuraklık analizlerinde kullanılan SPI ve SRI indeksleri, meteorolojik ve hidrolojik kuraklığın zaman içerisinde nasıl bir eğilim izleyebileceğini birlikte göstermiştir. Özellikle 2050 sonrasında hem kısa dönemli hem de mevsimsel ölçekte kuraklık şiddetinin arttığı görülmüştür. SRI sonuçlarında, üç dönem boyunca orta şiddetli ve şiddetli kuraklık yüzdelerinin istikrarlı şekilde artması, akım azalışlarının havza genelinde süreklilik kazanan bir eğilime dönüştüğünü göstermektedir. Meteorolojik kuraklık göstergeleri de benzer şekilde, yağış eksikliğine dayalı baskının gelecekte daha görünür hâle geleceğini ortaya koymuştur.

CBS tabanlı mekânsal analizler ise kuraklık riskinin havzanın her bölgesinde aynı yoğunlukta gerçekleşmeyeceğini göstermiş, özellikle topoğrafik ve arazi kullanım özellikleri nedeniyle bazı alanların diğerlerine göre daha duyarlı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu durum, gelecekte uygulanacak su yönetimi politikalarının bölgesel ölçekte farklılaştırılması gerekliliğini açık biçimde göstermektedir.

Kuraklık eğilimleri, özellikle kötümser (RCP 8.5) senaryoda daha belirgin bir artış göstermektedir. 2075–2100 dönemi, diğer periyotlara kıyasla daha yüksek kuraklık şiddetleriyle dikkat çekmektedir. Hem meteorolojik hem de hidrolojik kuraklık eğilimleri

paralellik göstermekte; bu da gelecekteki su stresi ve tarımsal üretim üzerindeki baskıyı artırmaktadır.

Meteorolojik kuraklık analizleri, 3, 6 ve 9 aylık dönemlere karşılık gelen Standart Yağış İndeksi (SPI3, SPI6, SPI9) değerleri kullanılarak yapılmıştır. Özellikle Ocak-Mart, Ocak-Haziran ve Ocak-Eylül periyotlarında Eskişehir ili Tepebaşı ve Odunpazarı ilçeleri kuraklık açısından en riskli bölgeler olarak öne çıkmaktadır. Bu bölgelerde arpa, buğday, yulaf ve nohut gibi yağışa dayalı ürünlerin üretimi sık görülmekte olup bu ürünler, ortalama her 4-5 yılda bir şiddetli meteorolojik kuraklıktan etkilenmektedir.

Hidrolojik kuraklık analizleri, SRI3, SRI6 ve SRI9 indekslerine göre yürütülmüş ve özellikle sulanan alanlar ile su yapıları açısından riskli bölgeler belirlenmiştir. Kütahya ili Baklan ve Bekilli ilçeleri, hem 6 hem de 9 aylık periyotlarda şiddetli hidrolojik kuraklık riski açısından öne çıkmaktadır. Bu bölgelerde mısır, şeker pancarı ve yonca gibi sulanan ürünler yoğunlukla yetiştirilmekte olup yaklaşık her 4 yılda bir şiddetli hidrolojik kuraklığa maruz kalma riski taşımaktadırlar.

Kuraklık risk haritaları, 10 km x 10 km çözünürlükte grid bazında hazırlanmış hem meteorolojik hem de hidrolojik analizlerde şiddetli kuraklık sınıfı esas alınmıştır. Bu sayede hem makro hem mikro düzeyde risk bölgeleri ayrıntılı biçimde ortaya konulmuştur.

Havza sınırları içinde bulunan tüm sulama altyapıları da risk değerlendirme sürecine dâhil edilmiştir. En önemli su yapılarından biri olan Porsuk Barajı, 9 aylık hidrolojik kuraklık değerlendirmesinde görece düşük risk grubunda yer almakta ve yaklaşık her 5-6 yılda bir şiddetli kuraklıktan etkilenebileceği öngörülmektedir. Buna karşın Kütahya Sulaması, Porsuk HES ve Başören Regülatörü, özellikle SRI9 analizine göre yüksek kuraklık riski altındadır.

Tarımsal ürünlerin kuraklıktan etkilenmesi, fenolojik dönemleriyle ilişkilendirilerek değerlendirilmiş; yağışa bağımlı ve sulanan üretim sistemleri ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu kapsamda, arpa, buğday, nohut gibi ürünlerin erken ilkbaharda görülebilecek

kuraklıklardan, mısır, pancar, marul gibi yazlık sulanan ürünlerin ise yaz aylarında görülebilecek hidrolojik kuraklıklardan etkilenme potansiyeli yüksektir.

Araştırma sonuçları göstermektedir ki, iklim değişikliğinin etkileri doğrultusunda Porsuk Havzası'nda meteorolojik ve hidrolojik kuraklık riskleri artış eğilimi göstermekte olup, bu riskler dönemsel farklılıklar sergilemekle birlikte özellikle 2075 sonrası dönemlerde önemli ölçüde yükselmektedir. Bu durum hem tarımsal üretim planlaması hem de su kaynakları yönetimi açısından daha esnek, yerel düzeyde farklılaşmış ve proaktif önlemlerin hayata geçirilmesini zorunlu kılmaktadır.

5.2 Öneriler

İklim değişikliğine bağlı kuraklık risklerine karşı etkili bir mücadele için öncelikle mevcut **Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Strateji ve Eylem Planlarının** içeriklerinin güçlendirilmesi gerekmektedir. Her 5 yılda bir yenilenen bu planlarda, hidrolojik ve meteorolojik projeksiyonlara dayanan bilimsel veriler mutlaka dikkate alınmalı; stratejiler bölgesel ve hatta mikro ölçekteki risk haritaları doğrultusunda belirlenmelidir. Özellikle 2060 sonrası döneme özel, uzun vadeli ve önleyici stratejilerin oluşturulması büyük önem taşımaktadır.

Belirlenen sonuçlar dikkate alındığında, kuraklık risklerinin azaltılmasına yönelik önlemlerin zaman boyutuna göre kademelendirilmesi, stratejilerin daha uygulanabilir ve sürdürülebilir olmasını sağlayacaktır.

Kısa Vadeli (1-5 yıl)

Kuraklıkla mücadelede yalnızca kriz anlarında devreye giren tepkisel yaklaşımlar yerine, proaktif ve risk temelli bir yönetim anlayışına ihtiyaç vardır. Bu doğrultuda:

- Erken uyarı sistemleri kurulmalı, Tarım ve Orman Bakanlığı, DSİ ve yerel müdürlüklerle bütünleşik biçimde çalışmalıdır.
- SPI ve SRI tabanlı ulusal bir kuraklık izleme ağı oluşturularak su kullanıcı örgütleri, tarım sigortaları, sulama planlaması ve rekolte tahminleriyle entegre edilmelidir.

- Çiftçilere yönelik su verimliliği, akıllı sulama teknikleri ve iklim uyum stratejileri hakkında yaygın eğitimler düzenlenmelidir.
- Açık kanal sulama sistemleri kapalı basınçlı sistemlere dönüştürülmeli, damla ve yağmurlama sulama yöntemleri kamu destekleriyle hızla yaygınlaştırılmalıdır.

Orta Vadeli (5–15 yıl)

- Tarım sektöründe hassas tarım teknolojileri ve dijital izleme sistemleri desteklenerek çiftçilere üretim sürecinde daha etkin çözümler sunulmalıdır.
- Kuraklığa dayanıklı tohum çeşitleri geliştirilerek yaygınlaştırılmalı, özellikle tahıl ve yem bitkileri için AR-GE faaliyetleri teşvik edilmelidir.
- Entegre havza yönetim planları hazırlanmalı, su tahsisi tarım, içme ve sanayi ihtiyaçlarını gözeterek adil ve sürdürülebilir biçimde yapılmalıdır.
- Arıtılmış atık suların yeniden kullanımı ve yeraltı sularının dengeli yönetimi yaygınlaştırılmalı; tarımsal sulamada alternatif su kaynaklarının kullanımı artırılmalıdır.
- Çiftçilerin risklere karşı korunması amacıyla kuraklık sigortası sistemleri daha erişilebilir ve etkin hale getirilmelidir.

Uzun Vadeli (15 yıl ve sonrası)

- Barajlar, regülatörler ve sulama altyapısı, iklim değişikliğine uyumlu şekilde modernize edilmeli, dayanıklılığı artırılmalıdır.
- Porsuk Havzası'na özgü uzun vadeli uyum stratejileri, ulusal politikalarla uyumlu olacak şekilde geliştirilmelidir.
- Komşu havzalarla iş birliği içerisinde çalışılarak bölgesel bir kuraklık izleme ve yönetim ağı kurulmalıdır.
- Su–gıda–enerji güvenliği kavramı bütünlük bir yaklaşım olarak benimsenmeli; geleceğe yönelik politikalar bu çerçevede şekillendirilmelidir.

Kuraklıkla mücadelede yalnızca kriz anlarında devreye giren tepkisel yaklaşımlar yerine, önleyici ve bütüncül bir bakış açısıyla risk temelli yönetim anlayışının hayata geçirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, **kuraklık izleme ve erken uyarı sistemleri** kurulmalı ve bu sistemler Tarım ve Orman Bakanlığı, DSİ ve yerel tarım orman il müdürlükleriyle

entegre şekilde çalışmalıdır. Kuraklığın yalnızca bir afet değil, aynı zamanda yönetilebilir bir doğal süreç olarak ele alınması, kaynak planlamasında daha etkili sonuçlar doğuracaktır.

Tarım sektöründe **iklim dostu ve akıllı uygulamaların** benimsenerek yaygınlaştırılması, sürdürülebilirlik açısından hayati bir gereklilik olarak öne çıkmaktadır. Hassas tarım teknolojileri, sensör destekli sulama sistemleri, uydu tabanlı izleme çözümleri ve bölgeye özgü dijital tarım platformları aracılığıyla çiftçilere **erken uyarı** sağlanmalıdır. Aynı zamanda, özellikle **kuraklığa duyarlı** ürünler (arpa, buğday, nohut gibi) için yerli ve dayanıklı çeşitlerin geliştirilmesi teşvik edilmeli; bu doğrultuda TÜBİTAK ve TAGEM gibi kuruluşlar nezdinde AR-GE yatırımları artırılmalıdır.

Su yönetimi boyutunda ise, açık kanal sulama sistemleri hızla kapalı basınçlı sistemlere dönüştürülmeli ve iletim kayıpları minimize edilmelidir. Modern sulama sistemlerinin yaygınlaştırılması, kamu destekleriyle teşvik edilerek hızlandırılmalı; özellikle su tasarrufu sağlayan **damla ve yağmurlama sulama yöntemleri**, Kırsal Kalkınma Yatırımlarının Desteklenmesi Programı (KKYDP) ile Avrupa Birliği'nin IPARD gibi kırsal kalkınmaya yönelik mali destek mekanizmaları kapsamında daha güçlü biçimde desteklenmelidir. Ayrıca, artırılmış **atık suların yeniden kullanımı ve yeraltı suyu yönetimi** konusundaki çalışmalara hız verilerek, su kaynaklarının sürdürülebilirliği güvence altına alınmalıdır.

Çalışmanın yürütülmesinde bazı kısıtlar da dikkat çekmektedir. Veri setlerinin 1980–2012 dönemiyle sınırlı olması, özellikle 2075 sonrası döneme ilişkin öngörülerin belirsizliğini artırmaktadır. Ayrıca HEC-HMS modelinin varsayımları ve sınırlı yerel veri setleri (ör. yeraltı suyu seviyeleri, arazi kullanım değişimleri) model sonuçlarını etkileyebilmektedir. Sosyo-ekonomik göstergeler (çiftçi gelirleri, girdi maliyetleri, ürün fiyatları) ise kısıtlı olarak değerlendirilebilmiştir. Bu durum, tarım politikalarıyla doğrudan ilişkilendirilmede bazı boşluklara yol açmıştır.

Gelecek çalışmalar açısından, **daha uzun dönemli ve yüksek çözünürlüklü meteorolojik-hidrolojik verilerin temini**, farklı **iklim ve hidrolojik modellerin**

karşılaştırmalı kullanımı ve **duyarlılık analizlerinin** yapılması, öngörülerin güvenilirliğini artıracaktır. Ayrıca, **SSP (Paylaşılan Sosyoekonomik Yollar) senaryolarının** da entegrasyonu ile sosyo-ekonomik boyut daha güçlü ele alınabilecektir. Havza düzeyinde **yeraltı suyu gözlem ağlarının genişletilmesi**, su kullanım verilerinin düzenli izlenmesi ve **ürün desenlerinin su verimliliği açısından yeniden planlanması**, Porsuk Havzası'nda gelecekteki uyum stratejilerine önemli katkılar sunacaktır.

Kurumsal düzeyde ise **kuraklık izleme ve yönetim kapasitesinin** artırılması gereklidir. SPI ve SRI verilerine dayanan ulusal düzeyde entegre bir kuraklık izleme ağı oluşturulmalı; bu sistem su kullanıcı örgütleri, tarım sigortaları, sulama planlaması ve rekolte tahminleriyle entegre hale getirilmelidir. Ayrıca, kuraklıktan en fazla etkilenen bölgelerde Tarımsal Kuraklık İl Kriz Merkezlerinin **kurumsal kapasiteleri** güçlendirilmelidir.

Ayrıca, çiftçilerin ve yerel paydaşların kuraklık konusunda bilinç düzeyinin artırılması için **eğitim ve kapasite geliştirme** programları hayata geçirilmelidir. Kuraklıkla mücadele, iklim değişikliğine uyum, akıllı tarım uygulamaları, su ve sulama yönetimi gibi konularda verilecek eğitimler, adaptasyon sürecinin başarısı için temel taş niteliğindedir.

Bu çalışma, aynı zamanda Türkiye'nin ulusal ve uluslararası düzeyde yürüttüğü iklim değişikliği çalışmalarına da destek olabilecek niteliktedir. Paris Anlaşması kapsamında hazırlanan Ulusal Katkı Beyanları (NDC) için havza ölçekli kuraklık projeksiyonları ve risk analizleri bilimsel dayanak sağlayabilir. UNFCCC raporlamaları ile IPCC süreçlerine entegre edilebilecek metodolojik katkılar, Türkiye'nin küresel iklim diplomasisindeki konumunu güçlendirecektir. Ayrıca, çalışma bulguları Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SKA 2: Açlığa Son, SKA 6: Temiz Su ve Sanitasyon, SKA 13: İklim Eylemi, SKA 15: Karasal Yaşam) ile uyumlu öneriler içermektedir. Bu da Türkiye'nin uluslararası raporlamalarında ve AB Yeşil Mutabakat sürecinde önemli bir referans noktası oluşturabilir.

Sonuç olarak, Porsuk Havzası'nda yapılan bu çalışma, iklim değişikliğinin ve kuraklığın bölgesel düzeydeki etkilerini net biçimde ortaya koymakta ve bu etkilerin 2100 yılına kadar belirgin şekilde artacağını göstermektedir. Tarım, su yönetimi ve kırsal kalkınma açısından bu tür projeksiyonların dikkate alındığı, bilimsel veriye dayalı ve senaryo temelli politikalar artık bir tercih değil, zorunluluktur. Ulusal ve bölgesel strateji belgelerinde bu doğrultuda dönüşüm sağlanmalı; kuraklıkla mücadele sadece bugünü değil, geleceği güvence altına alan bir anlayışla yürütülmelidir.

KAYNAKLAR

- Aggarwal, P. K. 2008. Global climate change and Indian agriculture: Impacts, adaptation and mitigation. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 78(11), 911–919.
- AghaKouchak, A., Cheng, L., Mazdiyasni, O. and Farahmand, A. (2015). Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought. *Geophysical Research Letters*, 41(24), 8847–8852.
- Ahi, Y., Coşkun Dilcan, Ç., Köksal, D. D., and Gültaş, H. T. (2022). Reservoir evaporation forecasting based on climate change scenarios using artificial neural network model. *Water Resources Management*, 37(6), 1067–1082. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03365-0>.
- Akçapınar, M. C., and Çakmak, B. (2022). Ankara ili Ayaş ilçesinde kuraklığın değerlendirilmesi. *Uluslararası Biyosistem Mühendisliği Dergisi*, 12(1), 45–58. <https://doi.org/10.24180/ijabe.1024034>.
- Aksu, H., & Yaltı, S. (2019). Drought analysis of Iğdır, Turkey. *Turkish Journal of Agriculture-Food Science and Technology*, 7(12), 2227–2232. <https://doi.org/10.24925/turjaf.v7i12.2227-2232.3004>.
- Alsenjar, H., Aksu, H., and Çetin, M. (2022). The use of some specific drought indices to evaluate meteorological drought events in the Black Sea region of Turkey. *Çukurova Journal of Agricultural and Food Sciences*, 37(2), 261–272. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2801131>.
- Âmin, M. Shahid, S., and Khan, N. 2018. Climate change impact assessment on temperature and precipitation in arid region of Punjab, Pakistan using SimCLIM model. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(1–2), 55–70.
- Anlı, A.S. 2014. Güneydoğu Anadolu Bölgesindeki şehirlerde kıyas bitki su tüketiminin (ET₀) zamansal değişimi ve RDI (reconnaissance kuraklık indeksi) yöntemiyle meteorolojik kuraklık analizi. *Journal of Agricultural Sciences*, 20(3), 248-260. <https://doi.org/10.15832/tbd.82527>
- Anlı, A. S. 2017. Temporal variation of reference evapotranspiration and regional drought estimation using SPEI method for semi-arid Konya closed basin in Turkey. *European Water Journal*, (59), 231-238.
- Anlı, A. S. 2017. Temporal variation of reference evapotranspiration (ET₀) in Central Anatolia Region, Turkey and meteorological drought analysis via SPEI (standardized precipitation evapotranspiration index) method. *Uluslararası Tarım, Orman, Gıda Bilimleri ve Teknolojileri Konferansı, Nevşehir, Türkiye*.
- Anonim 2017a. Ulusal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planı (2017–2023). T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Ankara. <https://www.tarimorman.gov.tr/>
- Anonim 2017b. Sakarya Havzası Master Planı. DSİ Genel Müdürlüğü, Etüt ve Plan Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- Anonim 2019. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2019). Porsuk Havzası hidrolojik raporu. Ankara. DSİ Yayınları.

- Anonim 2021a. Yeşil Mutabakat Eylem Planı. Ticaret Bakanlığı. Ankara
- Anonim 2021b. Türkiye 2021 Yılı Kuraklık Değerlendirmesi Raporu. Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), Ankara. <https://www.mgm.gov.tr/>
- Anonim 2022. Devlet Su İşleri, Sakarya Havzası Nehir Havza Yönetim Planı Hazırlanması Projesi. Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Anonim 2023a. TÜİK. Türkiye istatistik yıllığı 2024: Arazi kullanımı ve tarımsal alanlar. Türkiye İstatistik Kurumu Yayınları. <https://www.tuik.gov.tr/>
- Anonim 2023b. Türkiye Tarımsal Kuraklık ile Mücadele Stratejisi ve Eylem Planı (2023-2027), TOB Yayınları, Ankara.
- Anonim 2024a. Türkiye istatistik yıllığı 2024: Arazi kullanımı ve tarımsal alanlar. Türkiye İstatistik Kurumu Yayınları. <https://www.tuik.gov.tr/>
- Anonim 2024b. DSİ 2024 Yılı DSİ'ce işletilen ve Devredilen Sulama Tesisleri Değerlendirme Raporu, DSİ Yayınları, Ankara.
- Apaydın, H., Şonmez, F. K., and Yıldırım, Y. E. (2004). Spatial interpolation techniques for climate data in the GAP region in Turkey. *Climate Research*, 28(1), 31–40.
- Apurv, T., Mehrotra, R., Sharma, A., and Goyal, M. K. 2017. Quantifying the cascading effect of droughts: A global analysis. *Advances in Water Resources*, 107, 482–495.
- Arnell, N. W. 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14(1), 31–52.
- Aydın, E., & Kemeç, S. (2023). Antropojenik etkiler ve iklim değişikliği baskısı altında sulak alanlar: Van Kalesi ve Çevresi Doğal Sit Alanı Örneği. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(3), 1139–1154. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1196351>
- Aydın, S. ve Genç, M. 2023. İklim değişikliği ve sürdürülebilir kalkınma amaçları: Politika uyumsuzluklarının değerlendirilmesi. *Sürdürülebilir Kalkınma ve Çevre Dergisi*, 2(2), 35–48.
- Azrak, M. ve Şaylan, L. 2019. Trakya Bölgesinde iklim değişikliğinin bitki su tüketimi üzerine etkisinin belirlenmesi. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 25(3), 356–364.
- Bae, D. H., Jung, I. W. and Lettenmaier, D. P. 2008. Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. *Journal of Hydrology*, 401(1–2), 90–105. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.012>.
- Bakış, R., Yazar, N., & Yazar, M. (2009). Porsuk Havzasındaki çok amaçlı barajlardan elektrik üretiminin araştırılması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(2).
- Baldwin, A. 2017. The imperative of climate migration: The geopolitical urgency of climate-induced displacement. *Geopolitics*, 22(1), 1–23.
- Barak, M. 2020. Türkiye’de ortaokul müfredatında iklim değişikliği eğitimi yaklaşımlarının karşılaştırılması. *Eğitimde Nitel Araştırmalar Dergisi*, 8(3), 960–982.
- Batisani, N. 2011. The spatio-temporal dimension of climate change-induced streamflow loss in semi-arid Botswana. *Applied Geography*, 31(4), 912–920.

- Blauhut, V., Gudmundsson, L., Stahl, K., Stagge, J. H., Tallaksen, L. M. and Blauhut, V. 2015. Estimating drought risk across Europe from reported impacts and drought indices. *Environmental Research Letters*, 10(8), 084017.
- Circi, A. ve Irmak, R. 2022. Meteorolojik kuraklık analizinde SPI metodunun uygulanması: Marmara Bölgesi örneği. *Türkiye İklim Dergisi*, 4(1), 44-58.
- Cologna, V., Thaker, J. and Siegrist, M. 2024. How extreme weather shapes public support for climate policy: Global evidence from cross-national data. *Nature Climate Change*, 14(1), 15–22.
- Cook, B. I., Anchukaitis, K. J., Touchan, R., Meko, D. M., & Cook, E. R. (2016). Spatiotemporal drought variability in the Mediterranean over the last 900 years. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(5), 2060–2074. <https://doi.org/10.1002/2015JD023929>.
- Copernicus Climate Change Service. (2022, August 22). European summer drought the worst in 500 years. Copernicus Climate Change Service. <https://climate.copernicus.eu/european-summer-drought-worst-500-years>.
- Çakmak, B., & Gökcalp, Z. (2011). Climate change and effective water utilization. *Research Journal of Agricultural Sciences*, 1(1), 87–95.
- Çakmak, B., & Gökcalp, Z. (2013). Kuraklık ve Tarımsal Su Yönetimi. *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi* (4), 1-11.
- Çelik, M. ve Yakar, A. 2024. Mersin’de kuraklık eğilimlerinin farklı kuraklık indisleriyle analizi: İklim değişikliği bağlamında bir değerlendirme. *Türkiye Tarımsal İklim Araştırmaları Dergisi*, 9(2), 55–67.
- Daccache, A., Weatherhead, E. K., Stalham, M. A., and Knox, J. W. 2011. Impacts of climate change on irrigated potato production in a humid climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12), 1641–1653. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2011.06.018>.
- Dai, X., Zhang, J., Liu, J., and Li, Y. 2020. An integrated framework for assessing the effectiveness of adaptation measures on irrigation water use under climate change in the Huai River Basin, China. *Agricultural Water Management*, 240, 106287.
- Danandeh Mehr, A., Sorman, A. U., Kahya, E., & Hesami Afshar, M. (2020). Climate change impacts on meteorological drought using SPI and SPEI: Case study of Ankara, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 65(2), 254–268. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1691218>.
- Daryanto, S., Wang, L. and Jacinthe, P. A. 2016. Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. *PLOS ONE*, 11(5), e0156362.
- Demir, G., Yüceer, H. ve Özcan, A. 2013. İklim değişikliği ve modelleme çalışmaları: Bilimsel bir değerlendirme. *Çevre ve İklim Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 45–58.
- Demircan, M. 2018. Türkiye’de iklim değişikliği ve kentleşme ilişkisi üzerine akademik çalışmaların değerlendirilmesi. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 16(2), 150–165.
- Demircan, M., Gürkan, H., Eskioğlu, O., Arabacı, H., & Coşkun, M. (2017). Climate change projections for Turkey: Three models and two scenarios. *Meteorological Research*, 14(1), 1–13. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/282505>.

- Deressa, T. T., Hassan, R. M., Ringler, C., Alemu, T. and Yesuf, M. 2009. Determinants of farmers' choice of adaptation methods to climate change in the Nile Basin of Ethiopia. *Global Environmental Change*, 19(2), 248–255.
- Diriba, L. T. 2023. Rainfall-runoff modeling using HEC-HMS and ArcGIS in Gelana watershed, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 12, 3.
- Ekinci, M. F. ve Ökde, E. 2021. Kırsal alanlarda iklim değişikliği algısı: Yozgat örneği. *Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 12(1), 27–42.
- Elagib, N. A., Al-Saidi, M. and Ribbe, L. 2019. Urban water–energy–food nexus: An overview of the interactions and policy implications under environmental stress. *Journal of Environmental Management*, 239, 395–408.
- Ennasr, M., Jarlan, L., Bouri, S., Tramblay, Y., Mourtjis, M. and Fakir, Y. 2016. Climate change impact on water resources in a semi-arid watershed in Morocco using a regional climate model and HEC-HMS. *Water Resources Management*, 30(14), 5021–5036.
- Eris, E., Cavuş, Y., Aksoy, H., Burgan, H. İ., Aksu, H., & Boyacıoğlu, H. (2020). Spatiotemporal analysis of meteorological drought over Küçük Menderes River Basin in the Aegean Region of Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(3–4), 1515–1530. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03378-5>.
- Ersoy, G. 2022. Türkiye’de geleceğe dönük kuraklık projeksiyonları: CMIP5 ve SPI temelli bir analiz [Yüksek lisans tezi, Hacettepe Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Esri 2020. What is ArcGIS? Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.com/en-us/what-is-arcgis>.
- Fant, C., Schlosser, C. A., Strzepek, K. M. and Reilly, J. M. 2016. Projections of water stress based on an ensemble of socioeconomic growth and climate change scenarios: A case study in Asia. *PLOS ONE*, 11(3), e0150633.
- FAO 2011. Horn of Africa Crisis: FAO’s Response. <https://www.fao.org>.
- FAO 2022. FAOSTAT emissions database. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Feldman, A. D. 2001. HEC-GeoHMS: GIS Tools for Support of HEC-HMS using ArcView. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center.
- Fereres, E. and Soriano, M. A. 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 147–159. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl165>.
- Freund, H., Holzmann, H., Schulte, A. and Schütze, N. 2017. Impacts of climate and land use change on the water resources in the Black Sea catchment. *Water Resources Management*, 31(4), 1285–1304.
- Gans, J. S. 2012. Innovation and climate policy. *Energy Economics*, 34(S1), S16–S20.
- Ghulam, A., Qin, Q., Teyip, T., Li, Z. L. and Wang, J. 2007. Modified perpendicular drought index (MPDI): A real-time drought monitoring method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(2), 150–164.

- Gondim, R. S., De Oliveira, R. P. and De Araújo, J. C. 2009. Climate change impacts on irrigation water requirements: A case study in Jaguaribe River Basin, Brazil. *Journal of Environmental Hydrology*, 17, 1–12.
- Gosling, S. N. and Arnell, N. W. 2013. A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change*, 121(3), 447–458.
- Görgüner, T. and Kavvas, M. L. 2020. Projected impacts of climate change on reservoir water supply and irrigation demand in the Mediterranean climate region of Turkey. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 29, 100690.
- Grecksch, K. 2018. Drought and water scarcity in the UK: Social science perspectives on governance, knowledge and outcomes. Palgrave Macmillan. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67092-1>.
- Groves, D. G., Yates, D. and Tebaldi, C. 2008. Developing and applying uncertain global climate change projections for regional water management planning. *Water Resources Research*, 44(12), W12413.
- Gümüş, V. ve Algin, H. 2016. Seyhan-Ceyhan Nehir Havzaları'nda meteorolojik ve hidrolojik kuraklık analizleri. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 22(2), 123–134.
- Güray, G. ve Akgün, D. 2024. İklim değişikliğinin kadın ve çocuk sağlığına etkisi: Kırılgan gruplar için bütüncül müdahale önerileri. *Toplum ve Sağlık Araştırmaları Dergisi*, 6(1), 14–29.
- Gürkan, B. 2015. İklim değişikliğinin ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) verimine etkisi: Türkiye örneği (Yüksek lisans tezi). Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- Gürkan, B., Acar, R. ve Yıldırım, M. 2016. Marmara Bölgesi'nde iklim değişikliğinin ayçiçeği verimi üzerine etkisi. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 3(1), 15–22.
- Gürkan, B., Yıldırım, M. ve Acar, R. 2017. İklim değişikliği senaryolarına göre ayçiçeği (*Helianthus annuus* L.) verim tahminleri: Yapay sinir ağı yaklaşımı. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 10(2), 45–52.
- Gürler, Ç., Anlı, A. S., and Polat, H. E. 2024. Developing regional hydrological drought risk models through ordinary and principal component regression using low-flow indexes in Susurluk Basin, Turkey. *Water*, 16(11), 1473. <https://doi.org/10.3390/w16111473>
- Hamdan, A. S. Al-Rafai, R. A., and Al-Ansari, N. 2021. Rainfall-runoff modeling of Al-Adhaim River Basin using HEC-HMS and HEC-GeoHMS. *Journal of Water and Climate Change*, 12(6), 2166–2183.
- Hamidi, A., Karami, H. and Shahriari, A. 2021. Climate change and water resources management: Policy insights for adaptation planning. *Environmental Research Communications*, 3(4), 045003.
- Hanasaki, N., Fujimori, S., Yamamoto, T., Yoshikawa, S., Masaki, Y., Hijioka, Y., Kainuma, M., Kanamori, Y., Masui, T. and Takahashi, K. 2013. A global water scarcity assessment under Shared Socio-economic Pathways – Part 1: Water use. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2375–2391.

- Harmsen, E. W., González, J. E., Holupchinski, T., Steele, C. and Schlegel, N. 2009. Climate change impacts on water resources in the Caribbean. *Journal of Hydrology*, 353(1–2), 1–12.
- Hayaloğlu, P. 2018. İklim değişikliğinin tarım sektörü üzerine etkileri: Panel veri analizi. *Uluslararası Ekonomi ve Yenilik Dergisi*, 4(1), 79–94.
- Hisali, E., Birungi, P. and Buyinza, F. 2011. Adaptation to climate change in Uganda: Evidence from micro level data. *Global Environmental Change*, 21(4), 1245–1261.
- 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* (Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer [Eds.]). IPCC.
- IPCC 2021. *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC 2023. *Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, H.-O. Pörtner, R. Waterfield, vd., Eds.). IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.
- Ishak, W. M. W., Ramli, M. F., Haryati, A. and Yusof, K. W. 2016. Watershed delineation sensitivity to varying DEM resolutions and stream delineation thresholds using HEC-GeoHMS. *Malaysian Journal of Geosciences*, 2(1), 28–36.
- Islam, A. R. M. T., Shen, S. and Rahman, M. M. 2018. Assessment of climate change impact on rice yield and water footprint using model ensemble in Bangladesh. *Science of the Total Environment*, 643, 563–577.
- Islam, S. and Gan, T. Y. 2015. Assessing the impacts of climate change on irrigation water demand and crop yields in the South Saskatchewan River Basin. *Canadian Water Resources Journal*, 40(3), 216–232.
- Kaini, S., Sharma, R. R., Pradhananga, D. and Babel, M. S. 2021. Climate change impact on hydrology and crop water availability in the Koshi River Basin. *Environmental Challenges*, 3, 100043.
- Kang, Y., Khan, S. and Ma, X. 2009. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security – A review. *Progress in Natural Science*, 19(12), 1665–1674.
- Kara, M., Özdemir, H. and Yılmaz, M. 2021. Analysis of the impact of drought on surface water resources in the Gediz River Basin. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 45(3), 305–317.
- Korkmaz, Ö. 2023. İklim değişikliği kaygısı üzerine sosyo-demografik bir değerlendirme: Mersin örneği. *Çukurova Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 32(1), 149–165.
- Kurtoğlu, M. ve Keskin, E. 2024. Samsun ilinde kuraklık analizi: Standart Yağış İndeksi ve iklim senaryoları çerçevesinde değerlendirme. *Türkiye İklim Araştırmaları Dergisi*, 12(1), 45–58.

- Kwon, H. H., Moon, Y. I., Kim, T. W. and Kim, Y. 2018. Spatiotemporal analysis of drought propagation in South Korea. *Water Resources Management*, 32(10), 3333–3349.
- Köle, İ. ve Yiğitbaşıoğlu, H. 2013. İklim değişikliğinin Ankara ili su kaynakları üzerine etkisinin değerlendirilmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 1(3), 103–110.
- Lhomme, J. P., Masmoudi, M. M. and Annabi, M. 2009. Effects of climate change on durum wheat in Tunisia. *Climatic Change*, 96(4), 603–620.
- Liu, Y. and Mizzi, J. 2020. Combined impacts of land use and climate change on water resources using a hybrid SWAT model. *Water Resources Management*, 34(8), 2493–2507.
- Loon, A. F. V. and Laaha, G. 2015. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *Journal of Hydrology*, 526, 3–14.
- Maan, D. S., Rathore, P. K. and Garg, V. 2020. Hydro-informatics approach for flood forecasting using HEC-HMS model. *Applied Water Science*, 10(3), 1–11.
- Masia, S., Spano, D. and Snyder, R. L. 2018. Assessing climate change impacts on irrigation water requirements and reservoir evaporation in Mediterranean areas. *Agricultural Water Management*, 201, 1–11.
- Matiu, M., Ankerst, D. P. and Menzel, A. 2017. Interaction of temperature and drought in the United States: A spatial panel study of the impacts on maize and soybean yields. *Agricultural and Forest Meteorology*, 244–245, 88–100.
- Mendelsohn, R. 2009. The impact of climate change on agriculture in developing countries. *Journal of Natural Resources Policy Research*, 1(1), 5–19.
- Meza, F. J., Wilks, D. S. and Diaz, A. 2008. Impacts of climate change on irrigated maize in Şile, Turkey under SRES scenarios. *Climatic Change*, 88(4), 451–463.
- Mirgol, A., Ashraf, B. and Gohari, A. 2020. Climate change impact on irrigation water requirement of major crops in Qazvin Plain, Iran. *Agricultural Water Management*, 239, 106266.
- Mizyed, N. 2018. Impacts of climate change on groundwater recharge in arid regions: A case study from Palestine. *Hydrological Sciences Journal*, 63(3), 437–447.
- 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.
- Muleta, M. K. and Marcell, T. M. 2023. Modeling the impact of climate change on rainfall-runoff processes using HEC-HMS. *Hydrology*, 10(1), 42.
- Mwalukasa, N. 2013. Agricultural information sources and access to information by smallholder farmers in Tanzania. *International Journal of Education and Development using Information and Communication Technology (IJEDICT)*, 9(3), 63–84.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). *River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles*. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290.

- Newman, P. and Noy, I. 2023. The global economic impacts of climate-induced extreme weather events. *Environmental Research Letters*, 18(2), 024001.
- Ogunbode, C. A., Doran, R., Böhm, G., Poortinga, W., Tvinnereim, E. and Howard, S. 2020. The influence of contextual and psychological factors on the perceived risk of climate change in Norway. *Nature Climate Change*, 10(7), 636–641.
- Oğuz, S., Gökçeoğlu, C. ve Yılmaz, İ. 2022. Evaluation of the impact of drought on crop yield in the Nevşehir region of Turkey. *Journal of Arid Environments*, 200, 104705.
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R. and van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122(3), 387–400. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>
- Özdemir, A. 2021. Yuvacık Barajı Havzasında İklim Değişikliğinin Akım ve Sediment Taşınımına Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Özdemir, H., Demirel, M. C. and Eris, E. 2022. Effects of land use and climate change on hydrological regimes and non-point source pollution in drinking water basins. *Journal of Hydrology*, 610, 127927.
- Öztürk, T., Türkeş, M., Koç, T. and Kurnaz, M. L. 2014. Simulation of climate change in Turkey using the RegCM3 regional climate model. *Climate Research*, 59(1), 1–18.
- Panday, P. K. 2018. Assessing the impact of climate change on the hydrological regime of Yamuna River Basin, India. *Environmental Earth Sciences*, 77(1), 1–13.
- Porter, J. R., Xie, L., Challinor, A. J., Cochrane, K., Howden, S. M., Iqbal, M. M. and Travasso, M. I. 2019. Food security and food production systems. In *Climate Change 2019: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 485–533). Cambridge University Press.
- Poyraz, F. 2018. İklim değişikliğine bağlı meteorolojik kuraklık analizleri: CORDEX verilerine dayalı bir değerlendirme [Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Rajabi, M., Alizadeh, A., Kamgar-Haghighi, A. A. and Ashrafi, S. 2022. Estimation of irrigation water requirements under climate change scenarios in an arid region. *Agricultural Water Management*, 259, 107209.
- Rizal, A., Widodo, T. D., Hidayat, R. and Prasetya, R. 2023. Hydrological modeling using curve number calibration for flood response estimation with HEC-GeoHMS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1234, 012015.
- Rodriguez-Diaz, J. A., Weatherhead, E. K., Knox, J. W. and Camacho, E. 2007. Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Regional Environmental Change*, 7(3), 149–159. <https://doi.org/10.1007/s10113-007-0035-3>
- Sampath, P. G. D. H., Jayasundara, J. M. R. C. B. and Pathmarajah, S. 2015. Application of HEC–HMS model for runoff simulation in Deduru Oya river basin, Sri Lanka. *Engineer: Journal of the Institution of Engineers, Sri Lanka*, 48(1), 27–35.

- Silva, C. S., Weatherhead, E. K., Knox, J. W. and Rodriguez-Diaz, J. A. 2007. Predicting the impacts of climate change – A case study on paddy irrigation water requirements in Sri Lanka. *Agricultural Water Management*, 93(1-2), 19–29.
- Singh, V. P. and Woolhiser, D. A. 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(4), 270–292.
- Soydan, S. ve Beden, S. 2024. Kuraklık analizi: Burdur havzası örneği. *Göller Bölgesi Coğrafya Dergisi*, (1), 25–39.
- Srivastava, A. K., Kumar, A. and Laing, A. M. 2018. Assessment of climate change impacts on maize yield and identification of adaptation strategies in the Central Region of Ghana. *Climate Risk Management*, 20, 52–63.
- Sun, P., Xu, Y. P. and Liu, C. M. 2019. Probabilistic characteristics of hydrological drought regimes in the Huai River basin, China. *Science of the Total Environment*, 689, 1216–1229.
- Sun, S. K., Lü, Y. H., Yang, D. W., Liu, J. Y. and Zhao, W. J. 2018. Irrigation water demand under changing climate conditions in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management*, 210, 14–23.
- Sönmez, F. K., Kömüçü, A. Ü., Erkan, A. ve Turgu, E. 2005. Türkiye'de kuraklık analizi ve kuraklık haritalarının hazırlanması. *Türk Coğrafya Dergisi*, (44), 15–30.
- Şen, Z. 2009. Çukurova Yöresinde iklim değişikliğinin mısır verimi üzerindeki etkilerinin bölgesel iklim modeli ile belirlenmesi. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 6(3), 45–52.
- TARSİM 2024. Devlet Destekli Tarım Sigortaları Sistemi Uygulamaları.
- Taş, B. ve Yıldırım, M. 2019. İklim değişikliği senaryolarına göre Konya Kapalı Havzası'nda tarımsal kuraklık analizi. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(2), 285–294.
- Taş, İ., Yıldırım, Y. E. ve Aras, İ. 2020. Konya Kapalı Havzası için gelecekteki olası hidrolojik kurak dönemler. *Turkish Journal of Agricultural and Natural Sciences*, 7(1), 45–56.
- Terdo, F. and Adekola, O. 2014. Climate-smart agriculture for sustainable agricultural sectors: The case of Benue State, Nigeria. *Journal of Sustainable Development*, 7(5), 145–160.
- Theofanous, P. and Myronidis, D. 2020. Integrated use of HEC-GeoHMS and HEC-HMS models in ungauged basins for flood simulation and infrastructure planning. *Water*, 12(11), 2983.
- Thomas, R. J. (2008). Opportunities to reduce the vulnerability of dryland farmers in Central and West Asia and North Africa to climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 126(1–2), 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.011>.
- Tijdeman, E., Barker, L. J., Svensson, C., Hannaford, J. and van Lanen, H. A. J. 2022. Understanding the spatial variability of different drought types. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(3), 825–842.

- Turp, M. T., Öno1, B. and Koç, T. 2014. Projected changes in temperature and precipitation over Turkey based on RegCM4.3 and RCP scenarios. *Turkish Journal of Water Science and Management*, 1(1), 15–28.
- Twinomuhangi, R., Komakech, H. and Agaba, J. 2019. Assessing the impact of local climate change policy planning on smallholder farmers' adoption of climate-resilient practices in Uganda. *Climate and Development*, 11(9), 792–802.
- Türkeş, M. 2019. Türkiye’de iklim değişikliği, etkileri ve uyum politikaları. In M. Tayanç and M. İ. Türkeş (Eds.), *İklim Değişikliği ve Türkiye: Etkiler ve Politikalar* (pp. 25–54). İstanbul Politikalar Merkezi.
- Türkeş, M. 2008. Küresel iklim değişikliği ve Türkiye’ye olası etkileri. Türkiye Bilimler Akademisi (TÜBA) Raporları.
- Türkeş, M. (2020). Climate and drought in Turkey. In M. Z. Yercan, O. Gündüz, & A. K. Biswas (Eds.), *Water resources of Turkey* (pp. 85–125). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11729-0_4.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). (2021). HEC-HMS hydrologic modeling system user’s manual (Version 4.9). Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>
- Uçak, A., Kılıç, Ş. ve Büyükkasap, E. 2010. İklimsel değişimlerin mısır tarımı üzerine etkileri: Çukurova Bölgesi örneği. *Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 25(2), 65–72.
- UNCCD (United Nations Convention to Combat Desertification) 1994. UNCCD text with annexes. https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-11/UNCCD_TEXT_2017.pdf
- UNDP 2007. Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı
- UNEP 2022. Emissions Gap Report 2022: The closing window – Climate crisis calls for rapid transformation of societies. United Nations Environment Programme.
- UNFCCC 1992. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 1992. United Nations Framework Convention on Climate Change.
- UNFCCC 1998. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) 1998. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.
- UNFCCC 2015. Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division 2022. World population prospects 2022: Summary of results.
- Urwin, K. and Jordan, A. 2008. Does public policy support or undermine climate change adaptation? Exploring policy interplay across different scales of governance. *Global Environmental Change*, 18(1), 180–191.
- Uysal, H. S., Koyuncu, H. and Aydın, A. 2024. Integrated assessment of snowmelt runoff projections under climate change in the Euphrates Basin using HBV and HEC-HMS models. *Journal of Hydrologic Engineering*, 29(2), 04023098. <https://doi.org/10.1061/JHE>.

- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K. and Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1–2), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
- Vano, J. A., Scott, M. J., Voisin, N., Stöckle, C. O. and Lettenmaier, D. P. 2010. Climate change impacts on water management in the Yakima River Basin, Washington, USA. *Climatic Change*, 102(1–2), 287–317.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S. and López-Moreno, J. I. 2012. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 25(13), 4253–4271.
- Wada, Y., van Beek, L. P. H., van Kempen, C. M., Reckman, J. W. T. M., Vasak, S. and Bierkens, M. F. P. 2011. Global depletion of groundwater resources. *Geophysical Research Letters*, 37(20), L20402.
- Wei, X., Zhang, M. and Yang, S. 2009. Impact of climate change on grain production in China based on PRECIS climate model. *Agricultural Sciences in China*, 8(5), 586–593.
- Wilhite, D. A. 2000. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. In D. A. Wilhite (Ed.), *Drought: A global assessment* (pp. 3–18). Routledge.
- Wright, H., Kristjanson, P., Bhatta, G. and Tiwari, K. R. 2014. Integrating gender and social equity into climate-smart agriculture: Research, practice, and policy. *CIAT Working Paper*, 3–18.
- Xepapadeas, A. and Economides, G. 2018. Environmental policy and sovereign risk: The role of monetary and fiscal rules. *Environmental and Resource Economics*, 71(4), 1015–1038.
- Yang, H., Trindade, H., Abrantes, N., Gonçalves, P. and Santos, J. A. 2017. Climate change impacts on maize production and water use under Mediterranean conditions: A modeling perspective. *Agricultural Water Management*, 196, 58–70.
- Yano, T., Aydın, M. and Haraguchi, T. 2007. Impact of climate change on irrigation demand and crop growth in a Mediterranean environment of Turkey. *Sensors*, 7(10), 2297–2315.
- Yağbasan, A. 2016. Küçük Menderes Havzası'nda iklim değişikliğinin yer altı suyu beslenmesine etkisi. *Türkiye Jeoloji Bülteni*, 59(2), 223–240.
- Yörük, E. ve Akpınar, T. 2023. Üniversitelerde iklim değişikliği farkındalığına yönelik proje geliştirme gereksinimi. *Yükseköğretim ve Bilim Dergisi*, 13(1), 74–85.
- Yıldırım, B. ve Everest, B. 2020. Tarımsal kooperatiflerin iklim değişikliği ve yenilenebilir enerjiye ilişkin farkındalık düzeylerinin belirlenmesi: Çanakkale örneği. *Anadolu Tarım Bilimleri Dergisi*, 35(2), 231–239.
- Yıldırım, M., Gürkan, B. and Acar, R. 2016. İklim değişikliğinin haşhaş (*Papaver somniferum* L.) üretim alanlarına etkisi. *Türkiye Tarımsal Araştırmalar Dergisi*, 3(2), 55–63.
- Zelew, D. Z. and Melesse, A. M. 2018. Application of a semi-distributed hydrological model for surface runoff estimation in a watershed. *Water*, 10(10), 1360.