

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SENARYOLARI ALTINDA EROZYON RİSKLERİNİN
RUSLE MODELİ İLE TAHMİNİ VE KÜRESEL ATMOSFERİK
SALINIMLARIN YAĞIŞ EROZİVİTESİNE ETKİLERİ**

DOKTORA TEZİ

Ahmet Faruk İPEK

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

ŞUBAT 2026

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SENARYOLARI ALTINDA EROZYON RİSKLERİNİN
RUSLE MODELİ İLE TAHMİNİ VE KÜRESEL ATMOSFERİK
SALINIMLARIN YAĞIŞ EROZİVİTESİNE ETKİLERİ**

DOKTORA TEZİ

**Ahmet Faruk İPEK
(501222501)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ercan KAHYA

ŞUBAT 2026

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**ESTIMATION OF EROSION RISKS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS
USING THE RUSLE MODEL AND EFFECTS OF GLOBAL ATMOSPHERIC
OSCILLATIONS ON RAINFALL EROSIVITY**

Ph. D. THESIS

**Ahmet Faruk İPEK
(501222501)**

Department of Civil Engineering

Hydraulics and Water Resources Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Ercan KAHYA

FEBRUARY 2026

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501222501 numaralı Doktora Öğrencisi Ahmet Faruk İPEK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SENARYOLARI ALTINDA EROZYON RİSKLERİNİN RUSLE MODELİ İLE TAHMİNİ VE KÜRESEL ATMOSFERİK SALINIMLARIN YAĞIŞ EROZİVİTESİNE ETKİLERİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Ercan KAHYA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Mehmet ÖZGER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Cihan BAYINDIR
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Günay ERPUL
Ankara Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet KARACA
Rauf Denktaş Üniversitesi

Teslim Tarihi : 2 Şubat 2026

Savunma Tarihi : 27 Şubat 2026



Anneannem ve Babaanneme,





ÖNSÖZ

Gerek yüksek lisans gerekse doktora öğrenimime başladığım günden itibaren bilgi birikimi ve tecrübeleriyle her daim bana yol gösteren, çözüm odaklı bakış akışıyla ufkumu açan ve bu doktora tez konusunun seçilmesinde ve tezin hazırlanma sürecinde rehberlik eden kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Ercan KAHYA'ya en derin teşekkürlerimi sunarım.

Tez İzleme Komitesi Üyeleri, kıymetli hocalarım İstanbul Teknik Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Mehmet ÖZGER ile Ankara Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Günay ERPUL'a şükranlarımı arz ediyorum. Ayrıca tez savunma sınavıma katılarak görüş ve yorumlarıyla katkı sağlayan değerli hocalarım Prof. Dr. Mehmet KARACA ve Prof. Dr. Cihan Bayındır'a teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında fikir ve tecrübeleri ile bana her daim yol gösteren sevgili babama, beni hep destekleyen canım anneme ve sevgili kardeşime teşekkür ederim.

Çalışmamda kullanılan verilerin temininde ve her türlü bilgi ve tecrübe paylaşımında yardımcı olan Meteoroloji Eski Genel Müdür Yardımcısı Erol AYDIN'a, İklim ve Zirai Meteoroloji Dairesi Başkanı Elif Müdrike ÖZMUTLU'ya, Dr. Hüdaverdi Gürkan'a, Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdür Yardımcısı Dr. Kenan İNCE'ye teşekkürlerimi sunuyorum.

Ayrıca, bu çalışmanın yürütülmesi sürecinde sağlanan destekten dolayı İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkür ederim (Proje No: MDK-2024-46198).

Şubat 2026

Ahmet Faruk İPEK
(İnşaat Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	7
2.1. İklim Değişikliği ve Toprak Erozyonu Modelleri.....	7
2.2. Uzun Dönem Yağış Erozyon Değişimleri ve Atmosferik Salınımların Etkileri	12
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
3.1. Çalışma Alanı	17
3.2. Meteorolojik Gözlem İstasyonu Verileri.....	18
3.3. İklim Değişikliği Senaryoları	19
3.4. Modifiye Mann Kendall Trend Testi (M-MK)	20
3.5. Modifiye Fournier İndisi (MFI)	22
3.6. Yenilenmiş Evrensel Toprak Kayıpları Eşitliği (RUSLE)	22
3.6.1. Yağış erozyon (R) faktörü	23
3.6.2. Toprak erozyon duyarlılık (K) faktörü	24
3.6.3. Eğim uzunluğu ve eğim dikliği (LS) faktörü.....	24
3.6.4. Arazi kullanım (C) faktörü	25
3.6.5. Erozyon kontrol (P) faktörü.....	25
3.7. Sediment İletim Oranı (SDR).....	26
3.8. Atmosferik Salınımlar	26
3.8.1. El Niño–Güney salınımı (el niño–southern oscillation, ENSO)	26
3.8.2. Kuzey atlantik salınımı (north atlantic oscillation, NAO).....	27
3.8.3. 3 Boyutlu dairesel şiddet histogramı (3D circular magnitude histogram; 3D-CMH)	28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	31
4.1. Yağış Miktarı ve Modifiye Fournier İndeksi (MFI) Değişkenlerinin Zamansal ve Mevsimsel İncelenmesi.....	31
4.1.1. Modifiye Fournier indisi (MFI) zaman serisi analizi	31
4.1.2. Yağış miktarı ve modifiye Fournier indeksi (MFI) dağılımlarının mevsimsel analizi	33
4.1.3. Yağış miktarı ve modifiye Fournier indeksi (MFI) zaman serilerinin trend analizi	36

4.2 İklim Değişikliği Senaryoları Altında Toprak Erozyonu Projeksiyonları.....	40
4.2.1 Yağış erozivite (R) faktörü denklemi	40
4.2.2 RUSLE modeli parametrelerinin analizi	43
4.2.3 RUSLE tabanlı toprak erozyonu projeksiyonları ve sediment verimi tahmini	48
4.2.4 Alt havza ölçeğinde erozyon riskinin değerlendirilmesi	50
4.3 Atmosferik Salınımların Yağış Erozivitesi Üzerindeki Etkisi	53
4.3.1 NAO ve ENSO fazlarına göre yağış erozivitesi analizleri	54
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	75



KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
CAPRI	: Ortak Tarım Politikası Bölgeselleştirilmiş Etki
CBS	: Coğrafi Bilgi Sistemleri
CMIP6	: Birleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi Aşama 6
CORINE	: Çevresel Bilginin Koordinasyonu
ÇEM	: Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü
DEMİS	: Dinamik Erozyon Modeli İzleme ve Değerlendirme Sistemi
ENSO	: El Niño-Güney Salınımı
EPM	: Erozyon Potansiyel Modeli
IPCC	: Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli
MFI	: Modifiye Fournier İndisi
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
M-MK	: Modifiye Mann Kendall Trend Testi
MODIS	: Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektroradyometresi
MUSLE	: Modifiye Edilmiş Evrensel Toprak Kaybı Denklemi
NAO	: Kuzey Atlantik Salınımı
NASA	: ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
NDVI	: Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi
NOAA	: ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi
ONI	: Okyanus Niño İndeksi
RCP	: Temsili Konsantrasyon Rotaları (İngilizce Kısaltma)
SDR	: Sediment İletim Oranı
SSP	: Ortak Sosyoekonomik Yollar



SEMBOLLER

A	: Havza alanı (km ²)
t	: Ton
ha	: Hektar
x_i	: Veri noktası
sgn	: Signum (işaret) fonksiyonu
n*	: Düzeltme faktörü
n	: Toplam veri sayısı
t_i	: Her bir bağlı grubun gözlem sayısı
Var	: Varyans
V*	: Otokorelasyon etkilerinden arındırılmış varyans
ρ_s	: Verilerin i-inci dereceden otokorelasyonunu
Z	: Standardize edilmiş Mann–Kendall test istatistiği
P_i	: i ile gösterilen ayın yağış miktarı (mm)
P_{toplam}	: Yıllık toplam yağış miktarı (mm)
MJ	: Milyon joule
K	: Toprağın erozyona yatkınlığı
DG	: Geometrik ortalama tane çapı
C	: Kil yüzdesi
OM	: Organik madde
L	: Eğim uzunluğu
S	: Eğim dikliği
χ	: Sayısal Yükseklik Modeli'nden (DEM) türetilen akış birikimi
η	: Hücre boyutu
θ	: Derece cinsinden eğim dikliği
μ	: Yıl içindeki ortalama pik erozivite zamanlaması
κ	: Mevsimselliğin gücünü gösteren konsantrasyon parametresi
I₀ (κ)	: Modifiye Bessel fonksiyonu
E	: Yağış olayı sırasında oluşan toplam enerji
I₃₀	: Yağışın 30 dakikalık maksimum yoğunluğu
$\Delta\%$	: Fark yüzdesi



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1 : İstasyon bilgileri.	19
Çizelge 4.1 : Havzada erozyon sınıflarının görülme sayısı (1974-2023).	33
Çizelge 4.2 : R-faktörünün tahmininde kullanılan ampirik denklemler.	41
Çizelge 4.3 : R faktörünün tahmininde kullanılan ampirik denklemlerin performansı	42
Çizelge 4.4 : Farklı iklim senaryoları altında RUSLE ortalama R-faktörü ve yıllık toprak kaybı değerleri	49
Çizelge 4.5 : İstasyon bazında MFI pik zamanlamasının Von Mises dağılımı ile elde edilen istatistikleri.....	59
Çizelge 4.6 : İstasyon bazında ortalama MFI değerleri ve NAO–ENSO fazlarına bağlı yüzdesel sapmalar.	60



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Çalışma kapsamında seçilen meteoroloji gözlem istasyonları.	18
Şekil 4.1 : İstasyonlara ait Modifiye Fournier İndisi aylık zaman serileri.	32
Şekil 4.2 : İstasyonlara ait Modifiye Fournier İndisi yıllık zaman serileri.	32
Şekil 4.3 : İstasyon bazında yıllık MFI ve yağış verilerinin kutu grafik gösterimi. ..	34
Şekil 4.4 : İstasyon bazında aylık yağış verilerinin kutu grafiği gösterimi.	35
Şekil 4.5 : İstasyon bazında aylık MFI verilerinin kutu grafiği gösterimi.	36
Şekil 4.6 : Aylık yağış miktarı ve MFI trendlerinin karşılaştırılması.	38
Şekil 4.7 : Aylık Modifiye Fournier İndisi trend haritaları.	39
Şekil 4.8 : Yıllık Modifiye Fournier İndisi trend haritaları.	39
Şekil 4.9 : Küçük Menderes Nehri Havzası'nda farklı iklim senaryoları ve dönemler için R faktörünün mekânsal dağılımı.	44
Şekil 4.10 : Toprak erozyon duyarlılık (K) faktörünün mekânsal dağılımı.	46
Şekil 4.11 : Eğim uzunluğu ve eğim dikliği (LS) faktörünün mekânsal dağılımı.	47
Şekil 4.12 : Arazi Kullanım (C) Faktörünün mekânsal dağılımı.	47
Şekil 4.13 : RUSLE senaryolarına göre tahmin edilen toprak kaybının mekânsal dağılımı.	48
Şekil 4.14 : Farklı iklim senaryoları altında alt havza erozyon risk sınıflarının dağılımı.	51
Şekil 4.15 : Tüm yıllar için yağış erozivitesi (MFI) pik zamanlamasının mevsimsel konsantrasyonu.	55
Şekil 4.16 : NAO fazlarına göre yağış erozivitesi (MFI) pik zamanlamasının mevsimsel konsantrasyonu.	56
Şekil 4.17 : ENSO fazlarına göre yağış erozivitesi (MFI) pik zamanlamasının mevsimsel konsantrasyonu.	57



İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ SENARYOLARI ALTINDA EROZYON RİSKLERİNİN RUSLE MODELİ İLE TAHMİNİ VE KÜRESEL ATMOSFERİK SALINIMLARIN YAĞIŞ EROZİVİTESİNE ETKİLERİ

ÖZET

Toprak, ekosistemlerin işleyişi ve insan yaşamının sürdürülebilirliği açısından temel doğal kaynaklardan biri olup, erozyon süreçleri bu kaynağın nicelik ve nitelik kaybına yol açan başlıca çevresel sorunlar arasında yer almaktadır. Yağış kaynaklı toprak erozyonu, özellikle şiddetli ve yüksek enerjili yağış olaylarının etkisiyle hızlanmakta olup toprak verimliliğinin azalması, sediment taşınımının artması ve su kaynaklarının olumsuz etkilenmesi gibi çok boyutlu sonuçlar doğurmaktadır.

Bu çalışmada, Küçük Menderes Nehir Havzası'nda yağış erozivitesinin uzun dönemli zamansal özellikleri, büyük ölçekli atmosferik salınımlara bağlı değişimleri ve iklim değişikliği koşulları altında toprak erozyonundaki olası değişimler bütüncül bir yaklaşımla incelenmiştir. Bu kapsamda, 1974–2023 dönemine ait aylık yağış verileri kullanılarak yağış erozivitesini yansıtan Modifiye Fournier İndeksi (MFI) hesaplanmıştır. Aylık ve yıllık ölçekte zaman serileri oluşturularak MFI değerlerinin istasyonlar arası dağılım özellikleri, erozyon eşik sınıflarına göre görülme sıklıkları ve ekstrem davranışları analiz edilmiştir. MFI zaman serileri kullanılarak aylık ve yıllık ölçekte Modifiye Mann–Kendall testi ile trend analizleri yapılmıştır. Ayrıca sezonsal etkileri ayırtmak amacıyla aylık bazda trend analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar mekânsal haritalar üzerinde görselleştirilmiştir.

İklim değişikliğinin toprak erozyonu üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla, Yenilenmiş Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (RUSLE) modeli kullanılmıştır. Bu kapsamda, Ortak Sosyo-Ekonomik Yollar (SSP) arasından seçilen SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları altında, yüksek çözünürlüklü ve ölçek küçültme işlemi uygulanmış Birleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi Aşama 6 (CMIP6) tabanlı iklim projeksiyonları kullanılarak yakın (2021–2040), orta (2041–2060), geç (2061–2080) ve yüzyıl sonu (2081–2100) dönemleri için analizler gerçekleştirilmiştir. RUSLE modelinde kullanılmak üzere yağış erozivite (R) faktörünün belirlenmesi amacıyla, yüksek zamansal çözünürlüklü gözlemsel yağış verilerine dayalı olarak 10 farklı ampirik denklem karşılaştırmalı biçimde test edilmiş olup gözlemsel verilerle uyumu en yüksek ve Akdeniz iklim koşullarını en iyi temsil eden yaklaşım havza özelinde belirlenmiştir. Model belirsizliğini azaltmak amacıyla 13 adet yüksek çözünürlüklü CMIP6 Küresel Dolaşım Modeline dayalı çoklu model ortalamaları kullanılmıştır. RUSLE modeli kullanılarak farklı iklim senaryoları ve dönemler için toprak kaybının mekânsal dağılımı belirlenmiştir. Ayrıca 60 alt havza ölçeğinde yıllık ortalama toprak kaybına dayalı erozyon riski sınıflandırması yapılarak mekânsal risk haritaları oluşturulmuştur. Böylelikle, havzadaki erozyon riskinin hem zamansal hem de mekânsal ölçekte analiz edilmesi sağlanmıştır.

Çalışmanın bir diğer bileşeni, yağış erozivitesinin büyük ölçekli atmosferik salınımlarla olan ilişkilerinin incelenmesidir. Bu amaçla Kuzey Atlantik Salınımı (NAO) ve El Niño–Güney Salınımı (ENSO) fazları dikkate alınmış olup yağış erozivitesi piklerinin zamanlaması, olasılık yoğunluğu ve büyüklüğü, bu çalışma kapsamında önerilen 3 Boyutlu Dairesel Şiddet Histogramı (3D Circular Magnitude Histogram; 3D-CMH) yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu yaklaşım, yağış erozivitesi riskinin zamanlama, büyüklük ve olasılık yoğunluğu gibi farklı bileşenlerinin tek bir analitik çerçevede birlikte değerlendirilmesine ve büyük ölçekli atmosferik salınımların erozyon riskini yıl içinde hangi dönemlerde yoğunlaştırdığının incelenmesine olanak sağlamıştır. Çalışma kapsamında, uzun dönemli ortalama MFI değerleri kullanılarak, NAO ve ENSO fazlarına göre ortalamalar hesaplanmış ve erozivite değerlerinin bu büyük ölçekli atmosferik salınımlara nasıl tepki verdiği belirlenmiştir.

Elde edilen bulgular, uzun dönemli yağış erozivitesinin aylık ve yıllık ölçekte dalgalı bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Trend analizleri kapsamında, istasyonların çoğunda anlamlı bir artış veya azalış eğilimi bulunmadığı, bazı istasyonlarda ise belirli dönemlerde zayıf pozitif veya negatif eğilimlerin gözlemlendiği tespit edilmiştir. Mevsimsel değerlendirmelerde ise yaz aylarında artan, kış aylarında ise azalan trendler öne çıkmıştır.

RUSLE sonuçları, 1970–2000 referans döneminde ortalama yıllık toprak kaybı $29,56 \text{ t ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$, sediment verimi $6,81 \text{ t ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$ ve R faktörü $1250,4 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. SSP2-4.5 senaryosunda toprak kaybı yüzyıl boyunca sınırlı dalgalanmalarla belirgin bir U-şekilli desen sergilerken, SSP5-8.5 senaryosunda özellikle yüzyıl sonuna doğru azalan yağışlarla ilişkili belirgin düşüşler öngörülmüştür. Zamansal değişimlere rağmen erozyon riski mekânsal olarak büyük ölçüde korunmuş; yüksek eğimli alanlarda sürekli yüksek, daha düz bölgelerde ise görece düşük kalmıştır. Bu bulgular, iklim projeksiyonlarının toprak kaybının büyüklüğünü etkilediğini, ancak yüksek risk alanlarının mekânsal dağılımının hâlâ büyük ölçüde havzanın topoğrafik özellikleriyle belirlendiğini göstermektedir.

Havzada yağış erozivitesi pikleri kış aylarında yoğunlaşmıştır. NAO– evresinde mevsimsel yoğunluk belirli aylara sıkışarak artarken, NAO+ ve ENSO fazlarında sonbahar–kış dönemine daha geniş bir zamana yayılmış ve yoğunluk azalmıştır. NAO– fazında ortalama MFI yaklaşık %5 artmış ve erozivite riskinin belirgin biçimde yükseldiği tespit edilmiştir.

ESTIMATION OF EROSION RISKS UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS USING THE RUSLE MODEL AND EFFECTS OF GLOBAL ATMOSPHERIC OSCILLATIONS ON RAINFALL EROSIVITY

SUMMARY

Soil represents one of the most essential natural resources sustaining ecosystem functioning and human well-being, while soil erosion remains among the leading environmental processes responsible for land degradation worldwide. Rainfall-induced soil erosion is particularly sensitive to intense and high-energy precipitation events, leading to declines in soil fertility, increased sediment transport, and adverse impacts on water resources. In regions characterized by complex topography and climate variability, understanding both the magnitude and timing of rainfall erosivity is critical for reliable erosion risk assessments.

This study adopts an integrated approach to investigate long-term rainfall erosivity dynamics, their relationships with large-scale atmospheric oscillations, and potential changes in soil erosion under climate change conditions in the Küçük Menderes River Basin, western Turkey. Monthly rainfall records covering the period 1974–2023 were used to calculate the Modified Fournier Index (MFI) as an indicator of rainfall erosivity. Monthly and annual time series were constructed to examine temporal variability, inter-station differences, frequency distributions across erosion severity classes, and extreme erosivity behavior. Trend analyses were conducted using the Modified Mann–Kendall test at both annual and deseasonalized monthly scales, and the results were spatially visualized to reveal regional patterns.

The impacts of climate change on soil erosion were assessed by coupling the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) model with high-resolution, downscaled Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) climate projections under the Shared Socio-economic Pathways (SSPs), specifically the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. Analyses were performed for four future periods: near (2021–2040), mid (2041–2060), late (2061–2080), and end-of-century (2081–2100). To estimate the rainfall erosivity (R) factor, ten empirical formulations were systematically evaluated using high temporal resolution (sub-hourly) observational rainfall data. Among these, the formulation proposed by Torri et al. (2006) exhibited the lowest bias and showed the highest consistency with observed erosivity, suggesting that it is a suitable approach for Mediterranean climate conditions, particularly in applications where sub-hourly rainfall data are unavailable. Model uncertainty was reduced through the use of ensemble means derived from 13 CMIP6 Global Circulation Models. Soil loss was mapped for all scenarios and periods, and erosion risk classifications were performed at the scale of 60 subbasins, enabling integrated spatial and temporal assessments of erosion risk.

The influence of large-scale atmospheric oscillations on rainfall erosivity was also examined in this study. The North Atlantic Oscillation (NAO) and the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) were examined using the proposed 3D Circular Magnitude Histogram (3D-CMH) approach. By extending conventional circular representations with a magnitude dimension, this method enabled the simultaneous evaluation of erosivity timing, probability distribution, and magnitude within a single analytical framework, providing new insights into how atmospheric teleconnections modulate erosion risk throughout the year.

The results indicate that rainfall erosivity exhibits pronounced variability at both monthly and annual scales, characterized by strong fluctuations rather than a consistent long-term monotonic trend. Trend analyses revealed that most stations do not exhibit statistically significant increasing or decreasing tendencies, although weak positive or negative trends were detected at certain locations during specific periods. Seasonal analyses showed that increasing tendencies were more frequently observed during summer months, whereas decreasing tendencies were more common in winter.

RUSLE simulations indicate that the reference period (1970–2000) was characterized by a mean annual soil loss of $29.56 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, an average sediment yield of $6.81 \text{ t ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, and a rainfall erosivity factor (R) of $1250.4 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ across the Küçük Menderes River Basin. Under the intermediate emission scenario SSP2-4.5, projected soil loss values exhibit relatively limited inter-period variability throughout the 21st century. Slight increases are projected for the near (2021–2040) and late-century (2081–2100) periods, while comparatively lower values are simulated for the mid-century intervals (2041–2060 and 2061–2080), resulting in a subtle U-shaped temporal pattern in long-term soil loss evolution. This behavior suggests the absence of a strong monotonic trend under SSP2-4.5, with changes remaining within a relatively narrow range around the reference conditions.

In contrast, projections under the high-emission SSP5-8.5 scenario indicate a pronounced decline in rainfall erosivity and associated soil loss toward the end of the century, particularly during the 2081–2100 period. This reduction is primarily attributed to projected decreases in annual precipitation totals and a decline in the frequency of erosive rainfall events, which directly limit the magnitude of the R factor and subsequent soil loss estimates.

Despite these temporal variations in soil loss magnitude across scenarios and future periods, the spatial distribution of erosion risk remains largely persistent. Across most scenarios, areas classified as “very high” erosion risk consistently cover approximately 53–57% of the basin, while “high” risk zones account for roughly 27–32% of the total area. These high-risk zones systematically coincide with regions characterized by steep slopes and long hillslopes, whereas areas with gentler topography maintain comparatively lower erosion risk levels. This spatial stability suggests that topographic factors, particularly slope gradient and slope length, play an important role in controlling erosion processes at the basin scale. Only under the most extreme conditions simulated for the end-of-century SSP5-8.5 period does a partial weakening of erosion severity become evident, with the proportion of very high-risk areas decreasing to approximately 48%.

Overall, these results demonstrate that while climate projections significantly influence the temporal variability and magnitude of soil loss, the spatial pattern of

erosion risk is predominantly governed by basin topography, leading to persistent erosion hotspots that warrant targeted and long-term conservation strategies.

Rainfall erosivity peaks were found to concentrate mainly during winter months. During NAO– phases, erosivity peaks become more seasonally concentrated and increase in magnitude, resulting in elevated erosion risk over shorter time windows. Conversely, during NAO+ and ENSO phases, erosivity peaks are distributed over a broader autumn–winter period, leading to reduced seasonal concentration. Long-term average MFI values increase by approximately 5% during NAO– phases, highlighting the stronger influence of NAO compared to ENSO on regional hydroclimatic conditions.

Overall, the findings demonstrate that rainfall erosivity and soil erosion dynamics are shaped not only by long-term climate change but also by seasonal variability and large-scale atmospheric oscillations. Incorporating teleconnection effects such as NAO and ENSO into erosion assessments can enhance the realism of risk analyses and support the development of targeted and sustainable land management strategies, particularly in erosion-prone basins with complex topography.



1. GİRİŞ

Toprak erozyonu, dünya genelinde önemli bir çevresel sorun olarak kabul edilmektedir (Chappell ve diğ, 2016). Yağış kaynaklı erozyon, yağmur damlalarının doğrudan etkisi veya yüzey akışı sonucu toprak parçacıklarının yerinden kopmasıyla başlamakta, ardından bu malzeme yağış ve akış süreçleriyle taşınmaktadır (Deviren Saygın ve Erpul, 2019). Bu süreç; toprak besin maddelerinin kaybına, arazi bozulumunun hızlanmasına, su kalitesinin düşmesine ve akarsu ile göl sistemlerine taşınan sediment miktarının artmasına neden olmaktadır (Amundson ve diğ, 2015; Ghosh ve diğ, 2022).

Yamaç ve kanal süreçleri sonucunda ortaya çıkan erozyon ve sedimentasyon, nehir ve göllerde su kirliliğine yol açmakta ve baraj rezervuarlarının depolama kapasitesini azaltarak ciddi çevresel sorunlar oluşturmaktadır (Lal, 2001; Özşahin, 2023). Nitekim, şiddetli toprak kaybı, toprak ve su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini olumsuz yönde etkilemektedir (Gezici, 2025). Bu durum, havza ölçeğinde toprak kaybının doğru biçimde tahmin edilmesine dayalı planlama ile sürdürülebilir arazi-toprak yönetimi uygulamalarının kritik önem taşıdığını göstermektedir (Pınar ve diğ, 2020).

Türkiye; yarı kurak iklim koşulları, eğimli topoğrafyası ve sığ toprak özellikleri nedeniyle su erozyonuna karşı yüksek hassasiyet göstermektedir. Özellikle karasal ve Akdeniz iklimleri arasındaki geçiş zonlarında meydana gelen şiddetli yağış olayları, Orta Anadolu ve Ege Bölgesi'nde erozyon riskini daha da artırmaktadır. Bu koşullar sonucunda Türkiye genelinde yıllık ortalama toprak kaybı 8.24 t/ha düzeyine ulaşmakta ve ülke çapında taşınan toplam toprak miktarının yaklaşık 642 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir (Erpul ve diğ, 2018, 2020; Mohammadi ve diğ, 2025). Küresel ölçekte ortalama yıllık toprak erozyon oranı yaklaşık 2.4 t/ha/yıl olarak tahmin edilirken, Türkiye'de bu değerin belirgin biçimde daha yüksek olduğu belirtilmektedir (Wuepper ve diğ, 2020).

İklim değişikliği, yağış rejimlerinin hem miktar hem de zamansal özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Kahya ve diğ, 2016; Şen ve Kahya, 2021). Artan sera gazı emisyonları küresel sıcaklık artışına yol açmakta ve buna bağlı olarak bölgesel iklim

desenlerinde belirgin değişimler gözlenmektedir (Tavakoli ve De Smedt, 2012; Vicuna ve Dracup, 2007). IPCC (2013), 21. yüzyıl boyunca Akdeniz Havzası genelinde sıcaklık artışı ve yağış miktarında azalma öngörmektedir. Batı Türkiye’de, özellikle Ege ve Trakya bölgelerinde gözlenen yağış azalışları, değişen yağış rejimlerinin toprak erozyonu üzerindeki etkilerinin havza ölçeğinde değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır (Tayanç ve diğ, 2009).

Yağışa bağlı erozyonun belirlenmesinde, toplam yağış miktarının yanı sıra yağışın şiddeti ve yıl içindeki zamansal dağılımı da kritik öneme sahiptir. Uzun dönemli çalışmalar, yağış erozivitesinin çoğunlukla sınırlı sayıdaki yüksek enerjili yağış olayı tarafından belirlendiğini ve bu olayların gerçekleşme zamanlamasının erozyon riskini doğrudan etkilediğini ortaya koymaktadır (Angulo-Martínez ve Beguería, 2012). Bu durum, yağış rejimindeki mevsimsel yoğunlaşmaların ve aşırı olayların, ortalama iklim koşullarından bağımsız olarak erozyon süreçlerini şekillendirebildiğini göstermektedir.

Bununla birlikte, yağış rejimlerindeki değişimler yalnızca uzun dönemli iklim eğilimlerinin bir sonucu olmayıp, büyük ölçekli atmosferik salınımlar tarafından da yönlendirilmektedir. Güney Salınımı (SO), El Niño-La Niña olayları ve Kuzey Atlantik Salınımı (NAO) gibi telekoneksiyon desenlerinin Türkiye’de yağış miktarı, mevsimsel dağılımı ve hidrolojik değişkenler üzerinde etkili olduğu çok sayıda çalışmada gösterilmiştir. Bu salınımlar, yağışın yalnızca toplam miktarını değil, yıl içindeki zamansal dağılımını ve belirli dönemlerdeki yoğunlaşmasını da etkileyerek hidroklimatik süreçleri modüle etmektedir (Kadioğlu ve diğ, 1999; Karabörk ve Kahya, 2003; Karabörk ve diğ, 2005; Vazifehkah ve Kahya, 2018).

Özellikle NAO’nun fazlarına bağlı olarak, Akdeniz Havzası ve Türkiye genelinde yağış koşullarının belirgin biçimde farklılaştığı; negatif NAO evrelerinde kış yağışlarının artma eğilimi gösterdiği, pozitif evrelerde ise daha kurak koşulların hâkim olduğu yaygın biçimde tespit edilmiştir (Hurrell, 1995; Türkeş ve Erhat, 2003). Benzer şekilde, ENSO kaynaklı atmosferik salınım anomalilerinin Türkiye’de yağış desenleri üzerinde bölgesel ve mevsimsel ölçekte farklı tepkiler üretebildiği ifade edilmektedir (Kadioğlu ve diğ, 1999; Karabörk ve Kahya, 2003; Karabörk ve diğ, 2007).

Bu tür büyük ölçekli atmosferik salınımların yağış rejimleri üzerindeki etkileri dikkate alındığında, yağış erozivitesinin iklimsel dalgalanmalara verdiği tepkinin değerlendirilmesinde, yağışın zamansal yoğunlaşması ve olay ölçeğindeki özelliklerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu çerçevede, aşırı yağış olaylarının mevsimselliğini ve zamansal yoğunlaşmasını incelemek amacıyla dairesel istatistiksel yaklaşımların kullanılması önerilmektedir. Söz konusu yaklaşımlar, aşırı olayların yıl içerisindeki pik zamanlamasını ve olası kaymalarını ortaya koyarak, hidroklimatik süreçlerin mevsimsel dinamiklerinin daha ayrıntılı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır (Chen ve diğ, 2010; Dhakal ve diğ, 2015).

İklim değişikliğinin toprak erozyonu üzerindeki etkileri küresel ve bölgesel ölçekte incelenmiş olmakla birlikte, Türkiye’de havza ölçeğinde iklim projeksiyonlarına dayalı erozyon değerlendirmeleri sınırlı sayıdadır. Bununla birlikte, yağış erozivitesi yalnızca iklim değişikliğiyle değil; yağışların zamansal dağılımı, mevsimselliği ve büyük ölçekli atmosferik dolaşım süreçleri gibi birden fazla faktör tarafından da şekillenmektedir. Bu çerçevede, tez kapsamında Küçük Menderes Nehir Havzası’nda yağış erozivitesinin uzun dönemli eğilimleri, atmosferik salınımlara bağlı değişimleri ve iklim değişikliği koşulları altındaki toprak erozyonu süreçlerinin bütüncül bir bakış açısıyla incelenmesi hedeflenmiştir.

Tez kapsamında gerçekleştirilen analizler üç ana etapta yürütülmüştür;

- Uzun dönemli yağış verileri kullanılarak yağış erozivitesinin zamansal davranışı ve trendleri incelenmiştir.
- Havza ölçeğinde RUSLE modeli ve yüksek çözünürlüklü, ölçek küçültme yöntemi ile üretilen CMIP6 tabanlı iklim projeksiyonları aracılığıyla SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları altında, yakın (2021–2040), orta (2041–2060), geç (2061–2080) ve yüzyıl sonu (2081–2100) dönemleri için gelecekteki toprak erozyonundaki olası değişimler değerlendirilmiştir.
- NAO ve ENSO gibi büyük ölçekli atmosferik salınımların yağış erozivitesi üzerindeki etkileri, bu çalışma kapsamında geliştirilen; zamanlama, olasılık yoğunluğu ve büyüklük bileşenlerini birlikte ele alan dairesel istatistik temelli yöntem ile analiz edilmiştir.

Bu üç etapta yapılan çalışmalar ise aşağıda sırasıyla özetlenmiştir;

- Küçük Menderes Nehir Havzası ve çevresindeki istasyonlara ait 1974–2023 dönemine ait aylık yağış verileri kullanılarak, yağış erozivitesi Modifiye Fournier İndeksi (MFI) ile hesaplanmıştır. Analiz kapsamında, aylık ve yıllık uzun dönemli zaman serileri oluşturulmuştur. Literatürde önerilen MFI eşik değerleri kullanılarak havzada 50 yıllık erozyon sınıflarının görülme sıklıkları değerlendirilmiştir.
- MFI verileri kullanılarak aylık ve yıllık ortalama değerler için kutu grafikler oluşturulmuştur. Bu kapsamda, istasyonlar arasındaki dağılımsal farklılıklar, mevsimsel değişimler ve ekstrem değerler görselleştirilmiştir. Denizel ve karasal iklim koşullarının yağış ve yağış erozivitesi üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.
- MFI zaman serileri kullanılarak aylık ve yıllık ölçekte trend analizleri gerçekleştirilmiş ve trendlerin istatistiksel anlamlılığı Modifiye Mann–Kendall yöntemi ile incelenmiştir. Yıllık trend analizlerine ek olarak, sezonsal etkilerden arındırmak amacıyla her ayın kendi zaman serisi içinde ayrı ayrı trend analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda istasyonlar arasındaki zamansal ve mekânsal dağılım görselleştirilmiş, artan ve azalan trendler haritalar üzerinde gösterilmiştir.
- RUSLE modelinde yağış erozivite faktörünün (R) hesaplanması için 10 farklı ampirik denklem test edilmiş ve gözlemsel verilerle uyumlu, en düşük yanlılık (PBIAS) değerine sahip, Akdeniz iklim koşullarına en uygun denklem seçilmiştir.
- RUSLE modeli vasıtasıyla toplam toprak kaybının hesaplanabilmesi için beş temel girdi faktörü olan yağış erozivite (R) faktörü, toprak erozyon duyarlılık (K) faktörü, eğim uzunluğu ve eğim dikliği (LS) faktörü, arazi kullanım (C) faktörü ve erozyon kontrol (P) faktörü hesaplanmış ve her bir parametre için mekânsal dağılım haritaları oluşturulmuştur.
- R faktörü, model belirsizliğini azaltmak amacıyla yüksek çözünürlüklü 13 adet CMIP6 Küresel Dolaşım Modeli'nin çoklu model ortalamaları kullanılarak hesaplanmıştır.
- İklim değişikliğinin toprak erozyonu üzerindeki olası etkileri, RUSLE modeli ile SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları kullanılarak; yakın (2021–2040), orta

(2041–2060), geç (2061–2080) ve yüzyıl sonu (2081–2100) dönemlerini kapsayan dört farklı zaman dilimi için analiz edilmiştir.

- RUSLE modeli kullanılarak tüm senaryolar ve dönemler için toprak kaybının mekânsal dağılımı belirlenmiş ve erozyon risk haritaları oluşturulmuştur.
- Farklı iklim senaryoları altında, 60 alt havza ölçeğinde yıllık ortalama toprak kaybına dayalı erozyon riski sınıflandırması yapılarak alt havza bazlı mekânsal risk haritaları oluşturulmuştur.
- İlim projeksiyonlarına ek olarak, Kuzey Atlantik Salınımı (NAO) ve El Nio–Güney Salınımı (ENSO) gibi büyük ölçekli atmosferik salınımların havza ölçeğinde yağış erozivitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.
- Çalışma kapsamında geliştirilen 3 Boyutlu Dairesel şiddet Histogramı (3D Circular Magnitude Histogram; 3D-CMH) yöntemi kullanılarak, yağış erozivitesinin zamanlama, olasılık yoğunluğu ve büyüklük bileşenleri dairesel istatistik temelli bir analiz çerçevesinde birlikte incelenmiştir.
- Kuzey Atlantik Salınımı (NAO) ve El Nio–Güney Salınımı (ENSO) gibi büyük ölçekli atmosferik salınımların havza ölçeğinde yağış erozivitesi üzerindeki etkileri, 3 Boyutlu Dairesel şiddet Histogramı yöntemi kullanılarak, yağış erozivitesi piklerinin mevsimsel yoğunlaşması ve zamanlaması dikkate alınarak değerlendirilmiştir.
- Uzun yıllar ortalama erozivite değerlerinin, NAO ve ENSO fazlarına bağlı olarak gösterdiği değişim analiz edilmiştir.

Küçük Menderes Nehir Havzası zeline yürütülen bu tez çalışmasında geliştirilen metodoloji, farklı hidroklimatik koşullara sahip havzalara uygulanabilir nitelikte olup, daha geniş ölçekte karşılaştırılabilir değerlendirmelerin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Elde edilen çıktılar, yağış erozivitesi dinamiklerinin anlaşılmasına yönelik olarak bilimsel literatüre katkı sunacaktır.

Ayrıca bu tez çalışmasının, yağış erozivitesi ve toprak erozyonu üzerine yapılan mevcut çalışmalardan ayrılan temel yönü, hidroklimatik süreçleri ve erozyon dinamiklerini bütüncül bir çerçevede ele almasıdır. Çalışmada, Küçük Menderes Nehir Havzası zeline yağış erozivitesinin zaman serisi özellikleri, büyük ölçekli atmosferik salınımlara (NAO ve ENSO) bağlı değişimleri ve iklim değişikliği koşulları altında toprak erozyonundaki olası değişimler birlikte değerlendirilmiştir. Bu

kapsamda, literatürde sınırlı sayıda çalışmada ele alınan yağış erozivitesi–atmosferik salınım ilişkisi Türkiye koşulları için ilk kez ayrıntılı biçimde incelenmiştir.

Çalışmanın özgün katkılarından biri, yağış erozivitesinin zamanlama, olasılık yoğunluğu ve büyüklük bileşenlerini tek bir analitik yapı içerisinde ele alan 3 Boyutlu Dairesel Şiddet Histogramı (3D Circular Magnitude Histogram; 3D-CMH) yaklaşımının önerilmesi ve uygulanmasıdır. Bu yöntem sayesinde, erozivite riskinin yalnızca büyüklüğü değil, yıl içindeki dağılımı ve yoğunlaşma özellikleri de eş zamanlı olarak değerlendirilmiştir.

Öte yandan, Türkiye’de iklim değişikliği projeksiyonları kullanılarak geleceğe yönelik erozyon riskinin tahmin edildiği çalışmalar literatürde oldukça sınırlı olup, bu çalışma ele alınan havza ölçeğinde bir ilk niteliği taşımaktadır. RUSLE modelinin uygulanmasında, literatürde yaygın olarak tercih edilen tek bir yağış erozivite (R) faktörü formülünün doğrudan kullanılması yerine, havzanın iklim özellikleri dikkate alınarak farklı ampirik R faktörü denklemleri detaylı bir performans değerlendirmesine tabi tutulmuştur. Bu kapsamda, gözlemsel verilerle uyumu ve Akdeniz iklim koşullarını temsil etme başarısı en yüksek olan ampirik denklem havza özelinde belirlenerek uygulanmıştır.

Ayrıca, tek bir iklim modeli kullanımından kaynaklanabilecek belirsizlikleri azaltmak amacıyla, SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları altında yüksek çözünürlüklü 13 adet CMIP6 Küresel Dolaşım Modeli’ne dayalı çoklu model ortalamaları kullanılarak, 60 alt havza ölçeğinde toprak erozyon riskinin hem mekânsal sürekliliği hem de zamansal değişimi birlikte analiz edilmiştir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 İklim Değişikliği ve Toprak Erozyonu Modelleri

Toprak erozyonunun gelecekteki dinamikleri, iklim, arazi kullanımı, sosyoekonomik gelişmeler ve tarımsal çevre politikalarının ortak etkisiyle belirlenmektedir (Panagos ve diğ, 2021). Bu çok bileşenli yapı, erozyon süreçlerinin farklı mekânsal ve zamansal ölçeklerde değerlendirilmesini gerekli kılmakta ve konuya yönelik bilimsel çalışmaların artmasına neden olmaktadır. İklim koşulları ve arazi kullanımındaki değişimlerin toprak erozyonu üzerindeki belirleyici rolü, son yıllarda yapılan çok sayıda çalışmada ele alınmıştır.

Bu kapsamda, iklim değişikliğinin erozyon süreçlerine etkisini değerlendirmek amacıyla farklı havzalarda çeşitli modelleme yaklaşımları uygulanmıştır. Küresel ölçekli değerlendirmeler, havzaların yaklaşık %73'ünde gelecekte toprak erozyonunun artmasının beklendiğini, buna karşılık %27'sinde erozyon ve sedimentasyon oranlarında azalma görülebileceğini ortaya koymaktadır (Abeyasingha ve Ray, 2025). Her ne kadar genel eğilim artış yönünde olsa da, bölgesel projeksiyonlar erozyon tepkilerinin yerel ölçekte önemli farklılıklar gösterebildiğini ortaya koymaktadır.

Yenilenmiş Evrensel Toprak Kayıpları Eşitliği (RUSLE) farklı iklim ve arazi kullanım koşulları altında erozyon süreçlerinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılan modellerden biridir. Teng ve diğ. (2018) küresel ortalamanın yaklaşık iki katı hızla ısınma gözlenen Tibet Platosu'nda, artan sıcaklıklar ve şiddetli yağış olaylarının erozyon riskini artırdığına dikkat çekmiştir. Çalışmada, 2002–2016 dönemine ait gözlemsel veriler kullanılarak mevcut erozyon koşulları RUSLE ile değerlendirilmiş, ardından CMIP5 verilerine dayalı iklim değişkenleri kullanılarak 2050 yılı için yağış erozivitesi çoklu doğrusal regresyon yöntemiyle tahmin edilmiştir. Elde edilen projeksiyonlar, hem RCP2.6 hem de RCP8.5 senaryoları altında yağış kaynaklı erozyon oranlarında artış olacağını ortaya koymuştur.

Benzer şekilde, Avrupa ölçeğinde gerçekleştirilen çalışmalar da yağış erozivitesindeki değişimlerin toprak erozyonu üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Romanya’da Patriche ve diğ. (2023), iklim değişikliği koşulları altında yağış erozivitesindeki değişimlerin toprak erozyonu üzerindeki etkilerini değerlendirmek amacıyla RUSLE tabanlı mekânsal bir analiz gerçekleştirmiştir. Çalışmada, mevcut iklim koşulları için oluşturulan erozyon modeli, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında 2041–2060 ve 2061–2080 dönemlerine ait yağış erozivitesi projeksiyonlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, önümüzdeki on yıllarda yağış erozivitesindeki dinamiklere bağlı olarak toprak erozyonunun genel olarak artış eğiliminde olduğunu göstermiştir. Bu artışın, ülke genelinin yaklaşık %84–90’ını kapsadığı ve çoğunlukla hafif düzeyde gerçekleştiği belirtilmiştir. Ayrıca, Stefanidis ve Stathis (2018), Yunanistan’daki Portaikos Havzası’nda Erozyon Potansiyel Modeli (EPM) kullanarak iklim değişikliğinin erozyon üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada, yüzyıl sonuna doğru yıllık yağışta %21.2 azalma ve ortalama sıcaklıkta 3.6 °C artış öngörülmüş; bu iklimsel değişimlerin havza genelinde erozyon potansiyelinde %4.9’luk bir azalmaya yol açabileceği belirtilmiştir.

Türkiye’de iklim değişikliği senaryolarına dayalı olarak, havza ölçeğinde geleceğe yönelik erozyon riskini ele alan çalışmalar oldukça sınırlı düzeydedir. Bu kapsamda gerçekleştirilen güncel çalışmalardan biri olan Gezici ve diğ. (2025) Oltu Havzası’nda RUSLE modeli kullanarak mevcut koşullar ile SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları altında erozyon riskini incelemiştir. Çalışmada, 2023 yılı için havza genelinde ortalama erozyon oranı $49.90 \text{ t ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Geleceğe yönelik projeksiyonlarda ortalama erozyon değerlerinin büyük ölçüde sabit kalacağı belirtilirken, yağış erozivitesindeki mekânsal farklılıkların erozyon riskinin havza içindeki dağılımını etkilediği vurgulanmıştır.

İklim değişikliğinin erozyon üzerindeki etkilerinin daha gerçekçi biçimde ortaya konulabilmesi amacıyla, bazı çalışmalarda iklim senaryoları ile arazi kullanımına bağlı etkiler birlikte analiz edilmiştir. Etiyopya’daki Lake Tana Havzası’nda Getachew ve diğ. (2021), toprak erozyonunun tarımsal üretim, gıda güvenliği ve rezervuar sedimentasyonu üzerindeki etkilerine dikkat çekerek, erozyon riskini arazi kullanımı ve iklim değişikliği senaryoları birlikte ele alarak incelemiştir. Çalışmada, arazi kullanımındaki olası değişimler CA–Markov zincir modeli ile simüle edilmiş, iklim değişkenleri ise CanESM2 modelinden türetilen istatistiksel indirgeme verileriyle

temsil edilmiştir. Bu girdiler, RUSLE modeli ile Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ve uzaktan algılama teknikleri kullanılarak birleştirilmiş ve yağış erozivitesi, toprak aşınabilirliği, topoğrafya, arazi örtüsü ve koruma uygulamalarını içeren model parametreleri üzerinden toprak kaybı hesaplanmıştır. Bulgular, 2080'lere doğru toprak kaybında %10'a varan artışların öngörüldüğünü ve bu artışın, arazi kullanımındaki değişimlere kıyasla ağırlıklı olarak iklim değişkenliğinden kaynaklandığını ortaya koymuştur.

Benzer şekilde, yarı kurak bölgelerde gerçekleştirilen çalışmalar, iklim senaryolarına bağlı olarak erozyon tepkilerinin arazi kullanım türlerine göre farklılaşabildiğini göstermektedir. İran'ın yarı kurak bir bölgesinde gerçekleştirilen çalışmada Hateffard ve diğ. (2021) mevcut ve geleceğe yönelik iklim senaryoları altında su kaynaklı toprak erozyonundaki değişimleri incelemiştir. CMIP5 verilerine dayalı RCP2.6, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları kullanılarak yapılan analizler, özellikle mera alanlarında erozyon oranlarının diğer arazi kullanım türlerine kıyasla daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Bulgular, RCP2.6 ve RCP8.5 senaryoları altında mera alanlarında belirgin artışlar gözlenirken, RCP4.5 senaryosunda bazı dönemlerde mera alanlarında azalma ya da sınırlı değişimlerin söz konusu olduğunu göstermektedir.

Bölgesel çalışmaların yanı sıra, daha geniş mekânsal ölçekte gerçekleştirilen araştırmalar da iklim ve arazi kullanım değişimlerinin su kaynaklı toprak erozyonu üzerindeki etkilerini ortaya koymaktadır. Panagos ve diğ. (2021) Avrupa Birliği (AB) ve Birleşik Krallık'taki tarım alanları için RUSLE ve Ortak Tarım Politikası Bölgeselleştirilmiş Etki (CAPRI) modellerini birlikte kullanarak, iklim ve arazi kullanımındaki olası değişimlerin 2050 yılına kadar su kaynaklı toprak erozyonu üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. CMIP5 kapsamındaki çoklu küresel iklim modellerine dayalı RCP2.6, RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında yapılan projeksiyonlar, ortalama erozyon oranlarında %13–22.5 arasında bir artış olabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, çalışmada elde edilen sonuçların mekânsal olarak önemli farklılıklar içerdiği vurgulanmış; özellikle Güney İspanya ve Güney İtalya'nın bazı kesimlerinde, genel eğilimin aksine, toprak erozyonunda %100'e varan azalmalar tespit edilmiştir.

Sedimentasyon süreçleri, havzalarda gerçekleşen toprak erozyonunun baraj rezervuarlarına yansıyan en somut sonuçlarından biri olup, depolama kapasitesinin

azalması ve su kaynaklarının sürdürülebilirliği açısından kritik bir gösterge niteliği taşımaktadır (Lopes ve Araujo, 2019). Bu nedenle, erozyon çalışmalarında yalnızca potansiyel toprak kaybının değil, aynı zamanda sediment verimi ve rezervuar birikimi ile olan ilişkilerin de değerlendirilmesi önem kazanmaktadır.

Bu çerçevede, Türkiye’de Özşahin (2023), Trakya’da yer alan Naip Baraj Havzası’nda coğrafi bilgi sistemleri tabanlı RUSLE ve Modifiye Edilmiş Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (MUSLE) modellerini kullanarak yıllık ortalama toprak kaybını tahmin etmiş ve model çıktılarının güvenilirliğini rezervuar sedimentasyon verileri ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Çalışmada, mevcut koşullar altında havza genelinde yıllık ortalama erozyon değerlerinin $0.31-0.36 \text{ t ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$ aralığında değiştiği belirlenmiştir. Model sonuçlarının barajdaki sediment birikimiyle uyumlu olması, havza ölçeğinde erozyon-sedimentasyon ilişkisinin sayısal olarak ortaya konulabildiğini ve RUSLE-MUSLE yaklaşımının bu tür analizlerde etkin biçimde kullanılabileceğini göstermiştir.

Erozyon modelleme çalışmalarında iklim değişikliğinin etkileri çoğunlukla yağış rejimindeki değişimler üzerinden değerlendirilmekte olup, bu bağlamda yağış erozivitesi (R faktörü) kritik bir belirleyici olarak öne çıkmaktadır. Yağış erozivitesi, erozyon modellemelerinde yaygın olarak kullanılmasının yanı sıra, toprak kaybı potansiyelinin bağımsız bir göstergesi olarak da değerlendirilmektedir (Eekhout ve de Vente, 2022). RUSLE tabanlı projeksiyonlara paralel biçimde, küresel ölçekte yağış erozivitesinin genel olarak artacağı öngörülmekle birlikte, bu artışın bölgesel ölçekte belirgin farklılıklar gösterdiği vurgulanmaktadır. Bu eğilimi nicel olarak ortaya koyan Chen ve diğ. (2024) tarafından gerçekleştirilen CMIP6 temelli projeksiyonlara göre, küresel yağış erozivitesindeki değişimler orta yüzyılda (2041–2060) görece sınırlı kalırken, yüzyıl sonunda (2081–2100) özellikle SSP5-8.5 senaryosu altında daha belirgin artışlar göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, küresel yıllık yağış erozivitesinin yüzyıl sonuna kadar SSP1-2.6 senaryosu altında %2.6, SSP2-4.5 senaryosu altında %3.5 ve SSP5-8.5 senaryosu altında ise %6.4 oranında artmasının beklendiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, küresel kara alanlarının %76’sından fazlasında yağış erozivitesinde artış öngörülmekte olup, bu değişimlerin özellikle orta yüzyıldan itibaren daha belirgin hâle geleceği belirtilmektedir. Buna karşın, Akdeniz havzası ve Türkiye kıyı bölgeleri dâhil olmak üzere bazı alanlarda yağış erozivitesinde %15’i aşan azalmaların söz konusu olabileceği ifade edilmektedir.

Bölgesel ayrışmaların önemini vurgulayan bir diğer çalışma Panagos ve diğ. (2022) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 19 farklı CMIP5 küresel iklim modeli kullanılarak 2041–2060 ve 2061–2080 dönemleri için yüksek mekânsal çözünürlükte yağış erozivitesi projeksiyonları üretilmiştir. Küresel ölçekte yağış erozivitesinin 2050 ve 2070 yılları için belirgin artış eğilimi gösterdiği belirtilmekle birlikte, Yunanistan, Girit, Tibet Platosu ve Türkiye gibi bazı bölgelerde artış ve azalış eğilimlerinin bir arada görülebildiği ortaya konulmuştur. Özellikle RCP8.5 senaryosu altında, Türkiye'nin Ege ve Akdeniz kıyıları ile Güney Avrupa'nın bazı kesimlerinde yağış erozivitesinde %15'e varan azalmaların öngörülmesi, Akdeniz kuşağının küresel artış eğilimlerinden ayrıştığını göstermektedir. Bununla birlikte, küresel ölçekte yağış erozivitesindeki artışın, 2070 yılına kadar toprak erozyon oranlarında %30–66 aralığında bir yükselişi tetikleyebileceği vurgulanarak, iklim değişikliğinin erozyon süreçleri üzerindeki rolü ortaya konmuştur.

Yağış erozivitesindeki değişimlerin yalnızca toplam yağış miktarına değil, yağış olaylarının zaman ölçeği, sıklığı ve şiddetine de bağlı olduğunu gösteren çalışmalar dikkat çekmektedir. Bu kapsamda Grillakis ve diğ. (2020), Girit Adası için günlük zaman ölçeğine dayalı yeni bir yağış erozivitesi formülü geliştirerek, geleceğe yönelik projeksiyonları değerlendirmiştir. Çalışma sonuçları, yakın gelecekte tüm senaryolar altında yağış erozivitesinde görece sınırlı değişimler öngörürken, uzak gelecekte senaryolara bağlı olarak farklı yönlerde eğilimler ortaya koymuştur. Buna göre, RCP2.6 senaryosu altında yağış erozivitesinde artış beklenirken, RCP8.5 senaryosunda belirgin bir azalma tespit edilmiştir. Bu karşıt eğilimlerin, eroziv yağış olaylarının sayısındaki azalma ile olay şiddetindeki artışın birlikte etkisiyle şekillendiği belirtilmiştir.

Birçok çalışmada yağış erozivitesi (R faktörünün) tahmini için farklı basit ampirik eşitlikler doğrudan RUSLE uygulamalarında kullanılmıştır; ancak bu eşitliklerin RUSLE modeli içerisindeki görece performanslarını karşılaştırmalı olarak değerlendiren çalışmalar sınırlı sayıdadır (Sakhraoui ve Hasbaia, 2023). Bu kapsamda Efthimiou (2018), Yunanistan'daki Venetikos Havzası'nda dokuz farklı ampirik R faktörü eşitliğinin RUSLE çıktıları üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Çalışmada, yüksek zamansal çözünürlüklü yağış verilerinin sınırlı olması nedeniyle R faktörünün doğrudan doğrulanması mümkün olmadığından, RUSLE ile elde edilen yıllık ve çok yıllık toprak kaybı tahminleri, havzaya ait gözlemsel sediment verimleriyle dolaylı

olarak karşılaştırılmıştır. Diğer tüm RUSLE parametrelerinin sabit tutulduğu analizler sonucunda, Renard ve Freimund (1994) tarafından önerilen ampirik formülün, gözlenen sediment verimleriyle en düşük sapmayı göstererek en iyi uyumu sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca tüm yaklaşımların, havza içinde erozyona duyarlı alanların mekânsal olarak belirlenmesine olanak sağladığı vurgulanmıştır.

2.2 Uzun Dönem Yağış Erozivitesi Değişimleri ve Atmosferik Salınımların Etkileri

Yağış erozivitesinin zamansal özelliklerinin anlaşılmasına yönelik olarak, uzun dönemli yağış verilerine dayalı indekslerin kullanımı literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Türkiye’de bu yaklaşıma örnek teşkil eden çalışmalardan biri olan Oğuz (2019), Tokat yöresinde 1978–1995 dönemine ait saha gözlemleri ve yağış verilerini kullanarak RUSLE’nin yağış erozivitesi bileşenini yeniden değerlendirmiştir. Çalışmada, erozif yağışların süresi, şiddeti ve zamanlaması ayrıntılı biçimde incelenmiş; kısa süreli yüksek şiddetli yağışların toprak kaybı üzerindeki etkisi özellikle vurgulanmıştır.

Bununla birlikte, uzun dönemli aylık yağış verileri kullanılarak hesaplanan Modified Fournier Index (MFI) ile USLE R faktörü arasında güçlü bir ilişki tespit edilmiştir. Elde edilen bulgular, MFI’nin yüksek zaman çözünürlüklü pluviograf verilerinin bulunmadığı bölgelerde yağış erozivitesinin güvenilir bir göstergesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca Mann–Kendall ve Theil–Sen eğim kestirimcisi ile yapılan trend analizleri, yağışın fiziksel özellikleri, erozivite parametreleri ve buna bağlı toprak kaybında dönemsel olarak azalma eğilimlerinin varlığını göstermiştir. Bu yönüyle çalışma, yağış erozivitesinin uzun dönemli zaman serileri üzerinden değerlendirilmesinin ve MFI tabanlı analizlerin bölgesel erozyon çalışmalarında uygulanabilirliğini desteklemektedir.

Su erozyonunun yaygın olduğu bölgelerde, toprak ve su kaynaklarının sürdürülebilir biçimde korunabilmesi için yağış erozivitesinin zamansal ve mekânsal değişimlerinin ortaya konulması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda Türkiye’de gerçekleştirilen çalışmalardan biri olan Güney (2025), yağış rejimi bakımından dikkat çeken Muğla ilinde yağışların eroziv karakterini incelemiş; yağış erozivitesinin mekânsal dağılımını ve 1965–2019 dönemine ait yıllık ile aylık değişimlerini kapsamlı biçimde

değerlendirmiştir. Bu amaçla, bölgedeki meteoroloji istasyonlarından sağlanan uzun süreli yağış verileri kullanılarak niceliksel yağış erozivitesi göstergeleri hesaplanmış, elde edilen değerler haritalar aracılığıyla mekânsal olarak ortaya konulmuş ve zamansal eğilimler istatistiksel yöntemlerle incelenmiştir. Analiz sonuçları, çalışma alanında yağış erozivitesinin homojen bir dağılım sergilemediğini, en yüksek yıllık erozivite değerlerinin Marmaris ve yakın çevresinde yoğunlaştığını göstermiştir. Mevsimsel ölçekte yapılan değerlendirmeler, yağışların eroziv gücünün en yüksek olduğu dönemin kış ayları olduğunu, bunu sonbahar ve ilkbaharın izlediğini, yaz aylarında ise daha düşük değerlerin hâkim olduğunu ortaya koymuştur. Bununla birlikte, özellikle yaz kuraklığının ardından gerçekleşen sonbahar yağışlarında erozivitenin artma eğiliminde olduğu belirlenmiş ve bu durumun bölgedeki erozyon süreçlerini güçlendiren bir unsur olabileceği ifade edilmiştir. Çalışma, yağış erozivitesindeki bu yerel ve mevsimsel dinamiklerin dikkate alınmasının; bitki örtüsünün korunması, arazi kullanımının planlanması ve havza ölçeğinde erozyon kontrolüne yönelik uygulamaların geliştirilmesi açısından kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Türkiye’de atmosferik salınımların yağış rejimi üzerindeki etkileri, erozivite çalışmalarına dolaylı ancak güçlü bir zemin oluşturmaktadır. Bu kapsamda Karabörk ve Kahya (2003), Türkiye’de aylık yağışların Güney Salınımı’nın (SO) aşırı fazları olan El Niño ve La Niña olaylarıyla olan ilişkisini incelemiştir. Çalışmada, 1940–1993 dönemine ait aylık yağış verileri ile Güney Salınımı İndeksi (SOI) kullanılarak, ENSO fazlarına verilen bölgesel yağış tepkileri analiz edilmiştir. Bulgular, Batı Anadolu’da El Niño olayları sırasında Nisan–Temmuz döneminde, Doğu Anadolu’da ise Şubat–Haziran döneminde belirgin yağış artışlarının ortaya çıktığını göstermiştir. Buna karşılık, La Niña fazlarının Doğu Anadolu’da özellikle Nisan–Ekim döneminde kuraklık sinyalleriyle ilişkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, spektral ve korelasyon analizleri, ENSO olaylarının Türkiye yağışlarının yıllık döngüsünü belirli mevsimlerde modüle ettiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, orta enlemlerde yer alan Türkiye’nin yağış rejiminin tropikal kökenli atmosferik salınımlara duyarlı olduğunu ve bu duyarlılığın yağışın mevsimsel dağılımı üzerinden erozivite riskini dolaylı olarak etkileyebileceğini göstermektedir.

Benzer şekilde Karabörk ve diğ. (2005), Türkiye’deki iklimsel değişkenlerin büyük ölçekli atmosferik salınımlarla olan ilişkilerini inceleyerek, Güney Salınımı (SO) ve

Kuzey Atlantik Salınımı'nın (NAO) hidroklimatik süreçler üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada aylık yağış, akarsu akımı ile maksimum ve minimum sıcaklık verileri birlikte ele alınmış; El Niño ve La Niña gibi SO'nun aşırı fazlarının yanı sıra NAO'nun etkileri hem eşzamanlı hem de zaman gecikmeli korelasyon analizleriyle araştırılmıştır. Bulgular, SO'nun özellikle maksimum sıcaklıklar üzerinde karmaşık ve mekânsal olarak değişken etkiler oluşturduğunu, minimum sıcaklıklar üzerindeki etkisinin ise sınırlı kaldığını göstermektedir. Buna karşılık, NAO'nun kış mevsiminde Türkiye genelinde yağış ve akarsu akış desenleri üzerinde daha belirgin ve tutarlı bir etkiye sahip olduğu ortaya konulmuştur. Zaman gecikmeli analizler, NAO'nun yağış ve akım değişkenleri açısından belirli bir öngörü potansiyeli sunduğunu; SO'nun ise bu değişkenlerle olan ilişkilerinin daha zayıf kaldığını göstermektedir. Çalışma, Türkiye'de hidrolojik ve klimatolojik değişkenlerin büyük ölçekli atmosferik salınımlarla olan bağlantılarının, bölgesel ve mevsimsel farklılıklar içerdiğini vurgulamakta ve bu ilişkilerin fiziksel mekanizmalarına ilişkin açıklamalar sunmaktadır.

Yağış erozivitesinin büyük ölçekli atmosferik dolaşım örüntüleriyle olan doğrudan ilişkisini ortaya koyan sınırlı sayıdaki çalışmadan biri Angulo-Martínez ve Beguería (2012) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, İspanya'nın kuzeydoğusunda 1955–2006 dönemine ait günlük yağış verileri kullanılarak yağış erozivitesinin yıllar arası değişkenliği incelenmiş ve bu değişkenliğin Kuzey Atlantik Salınımı (NAO), Akdeniz Salınımı (MO) ve Batı Akdeniz Salınımı (WeMO) ile ilişkisi değerlendirilmiştir. Bulgular, her üç atmosferik salınımın negatif fazlarında yağışların eroziv gücünün belirgin biçimde arttığını, pozitif fazlarda ise zayıfladığını göstermiştir. Ayrıca, günlük erozivite serilerinin aşırı değer analizleri, negatif fazlar altında daha yüksek geri dönüş periyotlarına karşılık gelen erozivite değerlerinin beklendiğini ortaya koymuştur. Söz konusu bulgular, Akdeniz iklim kuşağında yer alan Türkiye'de yağışın mevsimsel dağılımını ve yoğunluğunu etkileyen atmosferik salınımların, erozivite riskinin zamansal özelliklerini şekillendirmede önemli bir arka plan sunduğunu düşündürmektedir.

Yağış erozivitesi, büyük ölçüde şiddetli ve kısa süreli yağış olayları tarafından belirlendiğinden, bu tür olayların yıl içindeki zamanlaması erozivite riskinin mevsimsel dağılımı açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu nedenle, aşırı yağışların hangi dönemlerde yoğunlaştığını ele alan çalışmalar, doğrudan eroziviteyi incelemese

dahi, eroziv süreçlerin zamansal dinamiklerinin anlaşılması için önemli bir kavramsal zemin sunmaktadır.

Dairesel istatistiklerin hidroklimatik zamanlama problemlerinde kullanımına yönelik sınırlı sayıdaki çalışmalardan biri olan Dhakal ve diğ. (2015) aşırı yağış olaylarının mevsimselliğindeki değişimleri dairesele istatistik çerçevesinde incelemiştir. Çalışmada, günlük ekstrem yağışların takvim yılı içerisindeki gerçekleşme tarihleri dairesele değişkenler olarak ele alınmış ve doğrusal yöntemlerin sınırlı kaldığı durumlarda dairesele istatistiklerin daha esnek ve açıklayıcı sonuçlar sunduğu ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, ekstrem yağışların mevsimsel yoğunlaşmasında istasyonlar arasında farklılaşan pik zamanlamaları ve çok modlu dağılımlar bulunduğunu göstermektedir. Bu yaklaşım, yağış erozivitesi gibi yıllık döngüsel bir yapı sergileyen değişkenlerin analizinde, maksimum riskin zamanlamasının doğrusal zaman eksenine yerine dairesele bir bağlamda değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Bu doğrultuda, erozivite piklerinin yıl içindeki konumunu ve mevsimsel yoğunlaşmasını modellemek amacıyla Von Mises dağılımı, döngüsel süreçlere uygun olasılık yapısı sayesinde etkili bir istatistiksel araç olarak öne çıkmaktadır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Çalışma Alanı

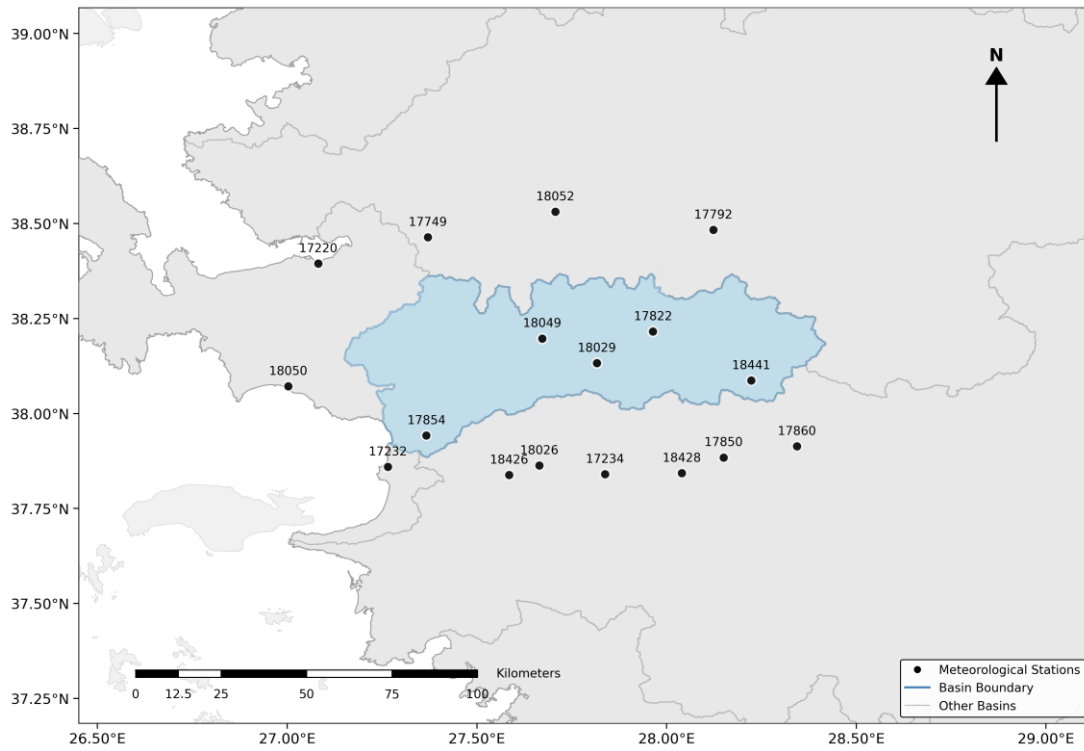
Küçük Menderes Havzası, Ege kıyılarında ve Türkiye'nin batı kesiminde yer almakta olup toplamda yaklaşık 352.871 hektarlık bir alanı içine almaktadır (Şekil 3.1). Arazi kullanımına bakıldığında, havza genelinde en yaygın kullanımın tarım amaçlı alanlar olduğu, orman ve yarı doğal alanların ise daha küçük paylara sahip olduğu görülmektedir (SYGM, 2018).

Havzanın doğu bölümlerinde daha engebeli ve eğimli araziler hakimdir; batıya doğru ilerledikçe eğimin azalmasıyla birlikte geniş ova alanları ortaya çıkmaktadır. Doğu–batı yönünde uzanan ve havzanın önemli bir kısmını kapsayan bu ova, bir yandan Ege Denizi, diğer yandan ise çevresinde yükselen dağlık kütlelerle sınırlanmaktadır (Yagbasan, 2016). Havza içinde, orman alanlarının tarıma dönüştürüldüğü yamaç sahalarda yürütülen tarımsal etkinlikler ile bitki örtüsünün seyrek olduğu işlenmiş alanların, mevcut koşullar altında orta ve yüksek düzeyde erozyon riski taşıdığı ifade edilmektedir (Gündüzoğlu ve Gündüzoğlu, 2025).

Bölge, yazların sıcak ve kurak, kışların ise ılıman ve yağışlı geçtiği Akdeniz iklimi özelliklerini sergilemektedir. Ortalama yıllık yağış 622 mm düzeyindedir. Havzanın çıkış noktasında $11,45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ yıllık ortalama akış ölçülmüştür (SYGM, 2016). Topoğrafyadaki belirgin farklılıklar, yağışın mevsimsel olarak yoğunlaşması ve tarım alanlarının geniş yayılım göstermesi birlikte ele alındığında; yüzey akışı ve toprak erozyonunun havza genelinde mekânsal açıdan değişken nitelik gösterebileceği anlaşılmaktadır. Bu özellikler, Küçük Menderes Havzası'nı, havza ölçeğinde toprak erozyonu süreçlerinin ve bu süreçlerin gelecekteki iklim değişikliğine verebileceği olası tepkilerin araştırılması açısından uygun bir örnek alan haline getirmektedir.

3.2 Meteorolojik Gözlem İstasyonu Verileri

Bu çalışmada, MGM'den temin edilen ve bölgenin coğrafi ile iklimsel çeşitliliğini temsil edecek şekilde havza içi ve yakın çevresinden seçilen, veri sürekliliği bulunan toplam 17 istasyona ait aylık ve yıllık toplam yağış verilerinden yararlanılmıştır. Çalışmada kullanılan istasyonlar ve coğrafi özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Analizlerde, ilgili bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanacağı üzere, her bir analiz amacına uygun olarak bu istasyonlardan oluşturulan alt kümeler değerlendirmeye alınmıştır.



Şekil 3.1 : Çalışma kapsamında seçilen meteoroloji gözlem istasyonları.

Çizelge 3.1 : İstasyon bilgileri.

İstasyon No	İstasyon Adı	Enlem	Boylam	Rakım	Verilerin Yılları
17220	İzmir Bölge	38.3949	27.0819	29	1974-2023
17232	Kuşadası	37.8597	27.2652	25	1974-2023
17234	Aydın	37.8402	27.8379	56	1974-2023
17749	Kemalpaşa	38.4639	27.3705	208	2010-2023
17792	Salihli	38.4831	28.1234	111	1974-2023
17822	Ödemiş	38.2157	27.9642	111	1974-2023
17850	Sultanhisar	37.8843	28.1504	73	1974-2023
17854	Selçuk	37.9423	27.3669	18	1974-2023
17860	Nazilli	37.9135	28.3437	84	1974-2023
18026	İncirliova/İncir Arş. (TAGEM)	37.8633	27.6647	50	2012-2023
18029	Tire	38.1330	27.8165	70	2012-2023
18049	Bayındır	38.1975	27.6719	70	2012-2023
18050	Menderes/Gümüldür	38.0720	27.0026	70	2012-2023
18052	Turgutlu	38.5312	27.7065	45	2012-2023
18426	Germencik	37.8381	27.5847	32	2014-2023
18428	Köşk	37.8431	28.0403	60	2014-2023
18441	Beydağ	38.0872	28.2233	215	2014-2023

3.3 İklim Değişikliği Senaryoları

Bu çalışmada, gelecekteki dönemler için yağışın eroziv etkisini tahmin etmek amacıyla WorldClim veri tabanına ait yağış verilerinden yararlanılmıştır. WorldClim, Eşleştirilmiş Model Karşılaştırma Projesi 6 (CMIP6) kapsamında üretilen iklim projeksiyonlarının ölçek küçültülmüş versiyonlarını sağlayan bir veri kaynağıdır (Fick

ve Hijmans, 2017). Analizler, yaklaşık 5 km’lik alansal çözünürlüğe karşılık gelen 2,5 yay dakikalık grid yapısındaki yağış verileri üzerinden yürütülmüştür.

İklim projeksiyonları tek bir modelden elde edilmemiştir. Bunun yerine 13 Küresel Dolaşım Modeli çıktısının birlikte değerlendirilmesiyle oluşturulan bir çoklu model ortalaması kullanılmıştır (ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, CMCC-ESM2, EC-Earth3-Veg, FIO-ESM-2-0, GISS-E2-1-G, HadGEM3-GC31-LL, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, UKESM1-0-LL). Bu yaklaşım, tekil modellere özgü belirsizliklerin etkisini azaltarak olası gelecek koşullarının daha güvenilir biçimde ortaya konmasına yardımcı olmaktadır (Yılmaz ve diğ, 2025; Ahmed ve diğ, 2020; Panagos ve diğ, 2022).

Çalışmada, 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 ve 2081–2100 dönemlerini kapsayan dört farklı gelecek zaman dilimi için projeksiyonlar üretilmiştir. Değerlendirmeler, iki ayrı Ortak Sosyoekonomik Yollar çerçevesinde yapılmış olup orta düzey azaltım senaryosu olan SSP2-4.5 ve yüksek emisyon seviyelerini temsil eden SSP5-8.5 senaryoları kullanılmıştır (O'Neill ve diğ, 2016).

3.4 Modifiye Mann Kendall Trend Testi (M-MK)

Hamed ve Rao (1998) tarafından geliştirilen Modifiye Mann-Kendall (M-MK) testi, zaman serilerindeki eğilimleri tespit etmek için kullanılan parametrik olmayan bir yöntemdir. Özellikle otokorelasyon (veriler arasındaki seri bağımlılığı) olduğunda, geleneksel Mann-Kendall testinin yetersiz kaldığı durumlar için geliştirilmiştir. M-MK yöntemi, varyans hesaplamasında otokorelasyonun etkisini dikkate alarak daha güvenilir sonuçlar sağlamaktadır. Veriler kronolojik sıraya göre sıralanıp her bir veri noktasını (x_i), kendisinden sonraki tüm veri noktaları (x_j) ile karşılaştırmak üzere veri çiftleri oluşturulmaktadır.

$$x_1, x_2, \dots, x_n \quad (3.1)$$

Bu çiftler aşağıdaki şekilde düzenlenmektedir.

$$i = 1, \dots, n - 1, j = i + 1, \dots, n \quad (3.2)$$

Her bir veri çifti için farklar hesaplanıp bu farkların işareti belirlenmektedir. Bu işlemler sonucunda S test istatistiği aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3.3)$$

Signum (işaret) fonksiyonu aşağıdaki ifadelerle tanımlanmaktadır.

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{eğer } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{eğer } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{eğer } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (3.4)$$

Veri sayısı (n) 10'dan büyükse, S test istatistiğinin varyansı aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} - \sum_{t=1}^P \frac{t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3.5)$$

Burada n toplam veri sayısını, P serideki bağlı (tekrarlı) grupların sayısı, t_i ise her bir bağlı grubun gözlem sayısını ifade etmektedir. M-MK yönteminde, otokorelasyonun etkisi düzeltilmiş varyans ile dikkate alınır. Düzeltme aşağıdaki şekilde yapılmaktadır.

$$V^*(S) = \text{Var}(S) \cdot \frac{n}{n^*} \quad (3.6)$$

Düzeltme faktörü (n^*) aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır.

$$n^* = n \cdot \left[1 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(n-i)(n-i-1)}{n(n-1)} \rho_s(i) \right] \quad (3.7)$$

Burada $\rho_s(i)$: Verilerin i -inci dereceden otokorelasyonunu ifade etmektedir. Elde edilen S ve $V^*(S)$ değerleriyle Z istatistiği hesaplanmaktadır.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V^*(S)}}, & \text{eğer } S > 0 \\ 0, & \text{eğer } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V^*(S)}}, & \text{eğer } S < 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

Elde edilen Z istatistiği, seçilen anlamlılık düzeyine (α) karşılık gelen normal dağılımın kritik değeri ($Z_{1-\alpha/2}$) ile karşılaştırılmaktadır. $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ olması durumunda sıfır hipotezi reddedilmekte ve seride istatistiksel olarak anlamlı bir trend olduğu kabul edilmektedir. $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$ olması durumunda ise sıfır hipotezi kabul edilmekte ve seride anlamlı bir trend olmadığı sonucuna varılmaktadır. Z istatistiğinin işareti trendin yönünü belirlemektedir, pozitif Z değerleri artan bir trendi, negatif Z değerleri ise azalan bir trendi ifade etmektedir (Mann, 1945; Kendall, 1975; Hamed ve Rao, 1998).

3.5 Modifiye Fournier İndisi (MFI)

Modifiye Fournier İndeksi (MFI), yağışın erozivite potansiyelini değerlendirmek için kullanılan önemli bir göstergedir. Yağış miktarının aylık ve yıllık dağılımını dikkate alarak bir bölgedeki yağış kaynaklı erozyon riskini sayısal olarak ifade etmektedir. MFI, aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır (Arnoldus, 1980). Modifiye Fournier İndeksi'nin her yıl için aylık yağışlar kullanılarak hesaplanmasının, uzun yıllar aylık ortalamalara dayalı yaklaşıma kıyasla yağıştaki yıllar arası değişkenliği daha iyi temsil ettiği ve erozivite riskini daha gerçekçi yansıttığı ortaya konmuştur (Apaydın ve diğ, 2006).

$$MFI = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_i^2}{P_{\text{toplama}}} \quad (3.9)$$

Burada; P_i , i'inci ayın yağış miktarını (mm) ifade eder. P_{toplama} , yıllık toplam yağış miktarıdır (mm).

3.6 Yenilenmiş Evrensel Toprak Kayıpları Eşitliği (RUSLE)

Yenilenmiş Evrensel Toprak Kayıp Denklemi (RUSLE), yağış ve buna eşlik eden yüzey akışı sonucunda meydana gelen uzun dönem ortalama yıllık toprak kaybını tahmin etmeye yönelik geliştirilmiş bir ampirik modeldir (Renard ve diğ, 1997). Modelin temel biçiminde yıllık toprak kaybı (A , $t \text{ ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$), beş ana bileşenin çarpımı olarak hesaplanmaktadır. Denklem aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (3.10)$$

Burada yağış erozivitesi faktörü R ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$) yağışın enerjisi ve şiddetini temsil ederken; toprak erodibilite faktörü K ($t \text{ ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) toprağın kopmaya ve taşınmaya ne ölçüde duyarlı olduğunu göstermektedir. LS faktörü (boyutsuz), eğim uzunluğu ve eğim şiddetinin erozyon süreçleri üzerindeki etkisini tanımlamaktadır. C faktörü (boyutsuz), bitki örtüsü ve arazi kullanımının erozyon üzerindeki rolünü ifade ederken; P faktörü (boyutsuz) teraslama veya kontur sürümü gibi destekleyici toprak koruma uygulamalarının etkinliğini göstermektedir (Wischmeier ve Smith, 1978; Renard ve diğ, 1997). RUSLE modeline ilişkin hesaplamalar ve raster işlemleri, Python'un rasterio, GDAL ve geopandas kütüphaneleri kullanılarak yürütülmüştür.

RUSLE'ye dayalı analiz belirli bir işlem sırasını izleyerek gerçekleştirilmiştir. Öncelikle, iklim projeksiyonları, toprak özellikleri, topoğrafya ve bitki örtüsü indislerini içeren RUSLE faktörlerine ait veriler projeksiyon, kapsam ve veri kalitesi açısından uyumlu hale getirilmiştir. Daha sonra tüm girdi katmanları, piksel bazında işlem yapılabilmesi amacıyla ortak bir mekânsal çözünürlüğe dönüştürülmüştür. Bunu izleyen aşamada, her bir RUSLE faktörü için (R, K, LS, C ve P) ayrı ayrı mekânsal dağılım haritaları üretilmiştir. Ardından bu katmanlar raster tabanlı çarpım yoluyla birleştirilerek yıllık toprak kaybı haritaları elde edilmiş ve sediment verimi tahminleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Son aşamada ise elde edilen toprak kaybı sonuçları, erozyon riskinin önceliklendirilmesine olanak tanıyacak biçimde alt havza ölçeğinde özetlenmiştir.

3.6.1 Yağış erozivite (R) faktörü

Yağış erozivite faktörü (R faktör), çıplak yüzeylerden toprak parçacıklarının yağış etkisiyle koparılıp taşınabilme potansiyelini ifade eder (Renard ve Freimund, 1994; Renard ve diğ, 1997). Renard ve Freimund (1994) çalışmalarında bu faktörü, yağışın kinetik enerjisi (E, MJ/ha) ile 30 dakikalık en yüksek yağış şiddetinin (I_{30} , mm/s) çarpımı olarak tanımlamaktadır. Ancak EI_{30} değerinin doğrudan hesaplanabilmesi için gerekli olan yüksek zaman çözünürlüklü yağış verileri çoğu meteoroloji istasyonunda ve özellikle iklim projeksiyonlarında bulunmamaktadır. Bu nedenle, literatürde mevcut yağış verilerinden R faktörünü dolaylı olarak tahmin etmeye yönelik çok sayıda ampirik ilişki geliştirilmiştir (Gezici ve diğ, 2025).

Bu çalışmada da yüksek çözünürlüklü yağış verileri bulunmadığından R faktörü doğrudan hesaplanmamış, ampirik yöntemlerden yararlanılmıştır. Yapılan karşılaştırma ve performans değerlendirmeleri sonucunda, R değerlerinin belirlenmesinde Torri ve diğ. (2006) tarafından önerilen bağıntının kullanılmasına karar verilmiştir. R faktörünün hesaplanmasında kullanılan ifade aşağıda verilmiştir.

$$R = 3.08 \times P - 944 \quad (3.11)$$

Burada R yağış erozyon şiddeti faktörünü ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$), P ise ortalama yıllık yağışı (mm) göstermektedir.

3.6.2 Toprak erozyon duyarlılık (K) faktörü

Toprak erodibilite faktörü (K faktörü), toprağın erozyona karşı ne ölçüde duyarlı olduğunu ifade eder ve bu duyarlılık; doku bileşimi, yapısal özellikleri ve organik madde miktarı gibi temel toprak özelliklerine bağlıdır (Patriche ve diğ., 2023). Çalışmada kullanılan K faktörü verileri, ulusal ölçekte yürütülen Dinamik Erozyon Modeli İzleme ve Değerlendirme Sistemi (DEMİS) kapsamında derlenen veri tabanından elde edilmiştir (Erpul ve diğ., 2018).

Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü (ÇEM) tarafından oluşturulan bu veri tabanı, K faktörünün hesaplanması için gerekli temel toprak özelliklerini içermekte olup 100 m mekânsal çözünürlükte sunulmaktadır. Veri tabanı, Türkiye genelinde açılmış yaklaşık 22.000 toprak profilinden elde edilen bilgiler üzerine dayanmaktadır. K faktörünün hesaplanmasında, Türkiye koşullarında denenmiş ve ulusal erozyon haritasının üretiminde de kullanılan Torri ve diğ. (1997, 2002) tarafından önerilen ampirik bağıntıdan yararlanılmıştır (Akgoz ve diğ., 2022). Çalışmada kullanılan bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$K = 0.0293(0.65 - D_G + D_G^2) \times e^{[-0.0021(\frac{OM}{C}) - 0.00037(\frac{OM}{C})^2 - 4.02C + 1.72C^2]} \quad (3.12)$$

Bu eşitlikte K toprağın erozyona yatkınlığını, DG geometrik ortalama tane çapını, C kil yüzdesini ve OM organik madde içeriğini göstermektedir.

3.6.3 Eğim uzunluğu ve eğim dikliği (LS) faktörü

LS faktörü, eğim uzunluğu (L) ve eğim dikliğinin (S) toprak erozyonu üzerindeki birleşik etkisini ifade etmekte olup, uzun yamaçlarda artan yüzey akışı birikimini ve dik eğimlerde yükselen akış hızını temsil etmektedir (Ghosal ve Das Bhattacharya, 2020). LS faktörüne ait veriler, Dinamik Erozyon Modeli İzleme ve Değerlendirme Sistemi (DEMİS) veri tabanından temin edilmiştir (Erpul ve diğ., 2018). Bu faktör, 10 m mekânsal çözünürlüğe sahip Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) kullanılarak ve Moore ve Burch (1986a, 1986b) tarafından önerilen yöntem esas alınarak üretilmiştir.

$$LS = \left(\frac{\chi\eta}{22.13} \right)^{0.4} \cdot \left(\frac{\sin \theta}{0.0896} \right)^{1.3} \quad (3.13)$$

Burada χ , Sayısal Yükseklik Modeli'nden (DEM) türetilen akış birikimini; η , hücre boyutunu; θ : ise derece cinsinden eğim dikliğini ifade etmektedir.

3.6.4 Arazi kullanım (C) faktörü

Bitki örtüsü ve arazi kullanımının erozyon süreçleri üzerindeki etkisini ifade eden C faktörü, yönetilen tarım alanlarında oluşan toprak kaybının, sürekli işlenen ve çıplak yüzeyli alanlarda meydana gelen kayba oranı olarak tanımlanmaktadır (Wischmeier ve Smith, 1978). Yağış damlalarının doğrudan yüzeye çarpmasını engelleyen bitki örtüsü, erozyonu önemli ölçüde azaltmakta olup, C faktörünün değeri; hâkim bitki türü, gelişim dönemi ve yüzeyi kaplama oranına bağlı olarak değişmektedir (Ghosal ve Das Bhattacharya, 2020).

Bitki örtüsünün C faktörü üzerindeki belirleyici rolü nedeniyle, bu faktörün mekânsal dağılımının belirlenmesinde uydu görüntülerinden türetilen bitki indeksleri yaygın biçimde kullanılmaktadır. Normalize Edilmiş Fark Bitki Örtüsü İndeksi (NDVI), kırmızı (RED) ve yakın kızılötesi (NIR) bant yansımaları arasındaki normalize farkı temel almakta ve -1 ile +1 aralığında değer alarak bitki örtüsünün durumu ve zamansal değişimini izlemek için yaygın biçimde başvurulmuş bir gösterge niteliği taşımaktadır (Rouse ve diğ., 1974).

Bu çalışmada, C faktörünün belirlenmesi amacıyla, 250 m mekânsal çözünürlüğe sahip Orta Çözünürlüklü Görüntüleme Spektrometresi (MODIS) MOD13Q1 16 günlük bileşik NDVI verileri kullanılmıştır. Yıl içindeki bitki gelişim döngüsünü temsil edebilmek için 2000 yılına ait toplam 20 görüntü, ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) Earthdata AppEEARS platformu üzerinden temin edilmiştir (NASA, 2024). Yıl boyunca alınan bileşik görüntüler, mevsimselliğe bağlı yanlılığı azaltarak yıllık bitki örtüsü koşullarının daha bütüncül biçimde temsil edilmesini sağlamıştır. C faktörünün hesaplanmasında Van der Knijff ve diğ. (1999) tarafından önerilen bağıntı kullanılmış olup, formülde $\alpha=2$ ve $\beta=1$ katsayıları esas alınmıştır.

$$C = e^{[-\alpha \times (\frac{NDVI}{\beta - NDVI})]} \quad (3.14)$$

Burada NDVI, Normalize Edilmiş Bitki İndeksi'ni ifade etmektedir.

3.6.5 Erozyon kontrol (P) faktörü

P faktörü, yüzey akışını azaltmaya yönelik koruyucu uygulamaların erozyon üzerindeki etkisini temsil etmekte olup 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Bu faktör

için 1 değeri, söz konusu uygulamaların bulunmadığı durumu ifade etmektedir. P faktörü, eğime paralel yapılan geleneksel tarımsal uygulamalara kıyasla destekleyici koruma önlemlerinin toprak kaybını azaltmadaki göreceli etkinliğini yansıtmaktadır (Wischmeier ve Smith, 1957; Renard ve diğ., 1997).

Bu çalışmada, koruyucu toprak işleme uygulamalarına ilişkin güvenilir ve mekânsal olarak tutarlı verilerin bulunmaması nedeniyle P faktörü tüm havza için 1 olarak kabul edilmiştir. Türkiye genelinde toprak koruma uygulamalarının yalnızca sınırlı alanlarda yaygın olduğu dikkate alındığında (Altıkat ve diğ., 2018), bu faktörün sabit alınmasının havza ölçeğindeki erozyon tahminleri üzerinde belirleyici bir etki yaratmayacağı değerlendirilmektedir.

3.7 Sediment İletim Oranı (SDR)

RUSLE, toprak kaybını tahmin etmekte ancak bu materyalin havza çıkışına ne kadarının ulaşacağını doğrudan hesaplamamaktadır. Havza çıkışındaki sediment verimini belirlemek için sediment iletim oranının (SDR) hesaplanması gerekmektedir. SDR; havza büyüklüğü, topoğrafya, arazi kullanımı ve toprak özellikleri gibi parametrelere bağlıdır (Ghavami ve diğ., 2024). Bu çalışmada, Küçük Menderes Havzası için sediment veriminin belirlenmesinde Boyce (1975) tarafından önerilen ampirik yaklaşım kullanılmıştır. Üstel formdaki bu bağıntı, yaygın kullanılan SDR yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir (Woznicki ve Nejadhashemi, 2013). Boyce denklemi aşağıdaki eşitlikle ifade edilmektedir.

$$SDR = 0.5656 A^{-0.11} \quad (3.15)$$

Burada SDR, sediment iletim oranını (boyutsuz) ve A havza alanını (km²) temsil etmektedir.

3.8 Atmosferik Salınımlar

3.8.1 El Niño–Güney salınımı (el niño–southern oscillation, ENSO)

El Niño–Güney Salınımı (ENSO), tropikal Pasifik Okyanusu’nda okyanus–atmosfer etkileşimleri sonucu ortaya çıkan doğal bir iklim salınımı olup, sıcak fazı temsil eden El Niño ile soğuk fazı ifade eden La Niña dönemlerini kapsamaktadır (Trenberth, 1997). Bu salınım, ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) tarafından

yaygın biçimde kullanılan Okyanusal Niño İndeksi (ONI) aracılığıyla izlenmektedir. ONI, tropikal Pasifik'te deniz yüzeyi sıcaklık anomalilerinin üç aylık hareketli ortalamasını temsil etmekte; +0,5 °C ve üzerindeki değerler El Niño, -0,5 °C ve altındaki değerler ise La Niña koşulları olarak tanımlanmaktadır (NOAA, 2025).

Normal koşullar altında, doğudan batıya doğru esen Alize rüzgârları sıcak yüzey sularını batı Pasifik'e doğru taşıırken, doğu Pasifik'te derinlerden soğuk suların yüzeye çıkmasına neden olmaktadır. Bu süreç, batı Pasifik'te sıcak ve yağışlı, doğu Pasifik'te ise görece serin ve kurak iklim koşullarının oluşmasını sağlamaktadır. El Niño evresinde Alize rüzgârlarının zayıflaması ya da yön değiştirmesiyle birlikte sıcak suların batıya taşınması azalmakta ve doğu Pasifik olağan dışı biçimde ısınmaktadır. Bunun sonucunda Avustralya, Endonezya ve Hindistan gibi batı Pasifik bölgelerinde kuraklık görülürken, doğu Pasifik'te yağışlarda artış yaşanmaktadır. La Niña evresi ise El Niño'nun tersine, Alize rüzgârlarının güçlenmesiyle batı Pasifik'te sıcak ve yağışlı, doğu Pasifik'te ise daha soğuk ve kurak koşulların hâkim olmasına yol açmaktadır (McPhaden ve diğ, 2006).

Bu küresel ölçekli iklim salınımının etkileri, dünyanın pek çok bölgesinde olduğu gibi Türkiye'de de iklim değişkenleri üzerinde belirgin biçimde hissedilmektedir. Karabörk ve diğ. (2003, 2007), El Niño dönemlerinde özellikle ilkbahar ve yaz aylarında Batı ve Doğu Anadolu'da yağışların arttığını, La Niña dönemlerinde ise Doğu Anadolu'da yağışların azaldığını ve aşağı yönlü kaymalar gösterdiğini ortaya koymuştur. Benzer şekilde Kadioğlu ve diğ. (1999), ENSO indeksinin yüksek olduğu El Niño evrelerinde Güney Türkiye'de yağışlarda azalma, Kuzeybatı Türkiye'de ise artış eğilimi gözlemlendiğini belirtmiştir.

3.8.2 Kuzey atlantik salınımı (north atlantic oscillation, NAO)

Kuzey Atlantik Salınımı (NAO), İzlanda çevresindeki alçak basınç alanı ile subtropikal kuşakta yer alan Azorlar yüksek basınç merkezi arasındaki basınç farkındaki değişimlerle tanımlanan büyük ölçekli bir atmosferik salınımdır (Hurrell, 1995). NAO'nun etkilerinin en belirgin biçimde kış mevsiminde ortaya çıkması nedeniyle, bu çalışmada faz ayrımı için NCAR İklim Analizi Bölümü tarafından sağlanan ve Hurrell'e dayanan istasyon-temelli DJFM NAO indeksi kullanılmıştır (Hurrell, 2003). Söz konusu indeks, Aralık–Mart dönemine ait basit bir ortalamayı değil; iki referans istasyonunun mevsimsel basınç anomalilerinin normalize edilmesi

ve bu değerlerin farkının alınmasıyla elde edilmektedir. NAO'nun pozitif (NAO^+) ve negatif (NAO^-) evreleri, indeks değerinin sırasıyla sıfırın üzerinde veya altında olmasına göre belirlenmiştir.

Pozitif NAO evresinde, iki basınç merkezi arasındaki farkın artmasıyla batı rüzgârları güçlenmekte ve yağış getiren sistemler ağırlıklı olarak Avrupa'nın kuzeyine yönelmektedir. Bu durum, Akdeniz Havzası ve Türkiye genelinde daha kurak koşulların hâkim olmasına yol açmaktadır. Negatif evrede ise basınç farkı azalmakta, batılı r zg rlar zayıflamakta ve Akdeniz üzerinden geçen cephesel sistemlerin sayısı artarak Türkiye'de yağışlı kış koşulları güçlenmektedir (Hurrell, 1995; Türkeş ve Erat, 2003).

Literatürde, NAO'nun Türkiye'nin hidroklimatik yapısı üzerinde belirgin etkiler oluşturduğu yaygın biçimde ortaya konmuştur. Özellikle kış ve sonbahar yağışlarının NAO fazlarına duyarlı olduğu; negatif NAO evresinin genellikle daha yağışlı, pozitif evrenin ise daha kurak koşullarla ilişkili olduğu belirtilmektedir (Türkeş ve Erat, 2003). Bunun yanı sıra, NAO'nun aşırı negatif evrelerinin Türkiye'de kış ve onu izleyen ilkbahar dönemlerinde hidrolojik kuraklığın azalması ve akımların artmasıyla bağlantılı olduğu; aşırı pozitif evrelerin ise birçok havzada kuraklık olasılığını yükselttiği ifade edilmektedir (Vazifehkah ve Kahya, 2018). NAO'nun yağış ve akım değişkenleri üzerindeki bu belirgin etkileri, Türkiye'de hidroklimatik süreçlerin değerlendirilmesinde güçlü bir tele-bağlantı deseni olarak öne çıktığını göstermektedir (Karabörk, 2005).

3.8.3 3 Boyutlu dairesel şiddet histogramı (3D circular magnitude histogram; 3D-CMH)

Hidrolojik değişkenlerin döngüsel bir yapıya sahip olması, mevsimsellik analizlerinde klasik doğrusal istatistik yaklaşımlarının yanıltıcı sonuçlar üretmesine neden olabilmektedir. Örneğin, takvimsel olarak ardışık olan Aralık ve Ocak aylarının doğrusal ortalamasının alınması, gerçekte olmayan bir şekilde yaz mevsimini işaret edebilmektedir. Bu tür hataların önüne geçmek ve yıllık döngünün sürekliliğini doğru biçimde temsil edebilmek amacıyla, çalışmada dairesel istatistik yöntemlerinden yararlanılmıştır.

Bu kapsamda, Normal (Gauss) dağılımın dairesel eşleniği olarak kabul edilen ve tek tepe değerine sahip dairesel verilerin modellenmesinde yaygın biçimde kullanılan Von Mises dağılımı, aylık MFI pik zamanlaması verilerine uygulanmıştır (Mardia ve diğ, 2008; Ruxton, 2017). Buna ek olarak, geleneksel iki boyutlu dairesel analiz yaklaşımı genişletilerek, pik erozivite büyüklüğünü temsil eden üçüncü bir boyut da görselleştirme sürecine dâhil edilmiştir.

MFI pik zamanlamasını ifade eden ve $(0 \leq \theta < 2\pi)$ aralığında tanımlanan rastgele açısal değişken θ için, Von Mises dağılımına ait olasılık yoğunluk fonksiyonu (PDF) aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır (Mardia ve Jupp, 1999):

$$f(\theta|\mu, \kappa) = \frac{1}{2\pi I_0(\kappa)} \exp(\kappa \cos(\theta - \mu)) \quad (3.16)$$

Burada μ ($0 \leq \mu < 2\pi$) pik erozivite olaylarının yıl içindeki ortalama zamanlamasını ifade eden ortalama yönü, κ ($\kappa > 0$) ise mevsimselliğin gücünü gösteren konsantrasyon parametresini temsil etmektedir. Yüksek bir κ değeri, olayların belirli bir mevsimde kümелendiğini (güçlü mevsimsellik) gösterirken, sıfıra yakın bir değer olayların yıl içine rastgele (üniform) dağıldığını göstermektedir.

Denklemdaki $I_0(\kappa)$ terimi, normalizasyon sabiti olarak görev yapan birinci türden sıfırıncı dereceden modifiye Bessel fonksiyonudur ve şu aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır (Mardia & Jupp 1999):

$$I_0(\kappa) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(\kappa \cos \theta) d\theta \quad (3.17)$$

Dağılım parametreleri (μ ve κ), Python scipy.stats kütüphanesi kullanılarak Maksimum Olabilirlik Kestirimi (MLE) yöntemiyle tahmin edilmiştir (Virtanen ve diğ, 2020).

Bu çalışma kapsamında, geleneksel frekans analizlerinin ötesine geçilerek, iki boyutlu Von Mises tabanlı dairesel gösterimin üçüncü bir boyutla zenginleştirildiği 3 Boyutlu Dairesel Şiddet Histogramı (3D Circular Magnitude Histogram; 3D-CMH) yaklaşımı önerilmiştir. Geliştirilen bu çok boyutlu görselleştirme yönteminde; i) açısal eksen, Von Mises dağılımı çerçevesinde olayların gerçekleştiği zamanlamayı, ii) radyal eksen, olayların zamansal dağılımını yansıtan olasılık yoğunluğunu (probability density), iii) renk ölçeği ise ilgili ayda gözlenen pik erozivite olaylarının ortalama

büyükliğini temsil etmektedir. Bu sayede, erozivite riskinin zamanlama ve şiddet bileşenleri tek bir analitik yapı içerisinde birlikte ele alınabilmektedir.



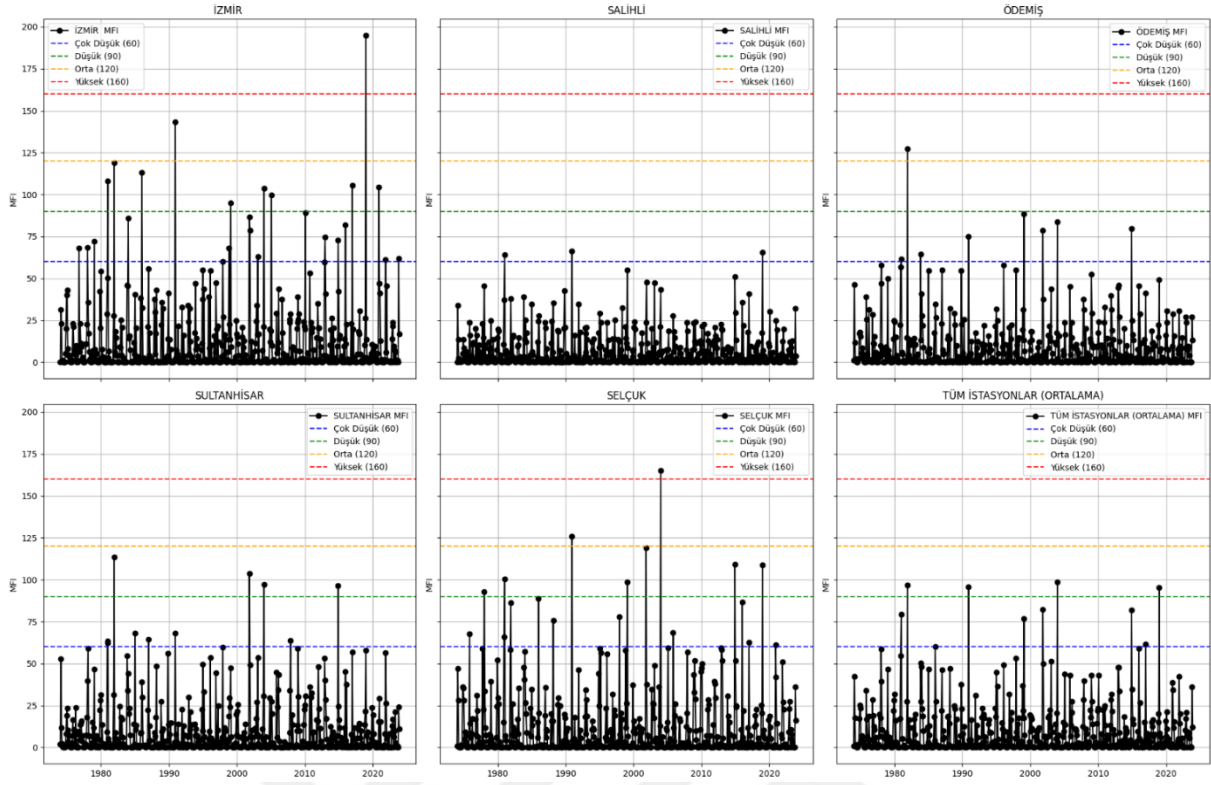
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Yağış Miktarı ve Modifiye Fournier İndeksi (MFI) Değişkenlerinin Zamansal ve Mevsimsel İncelenmesi

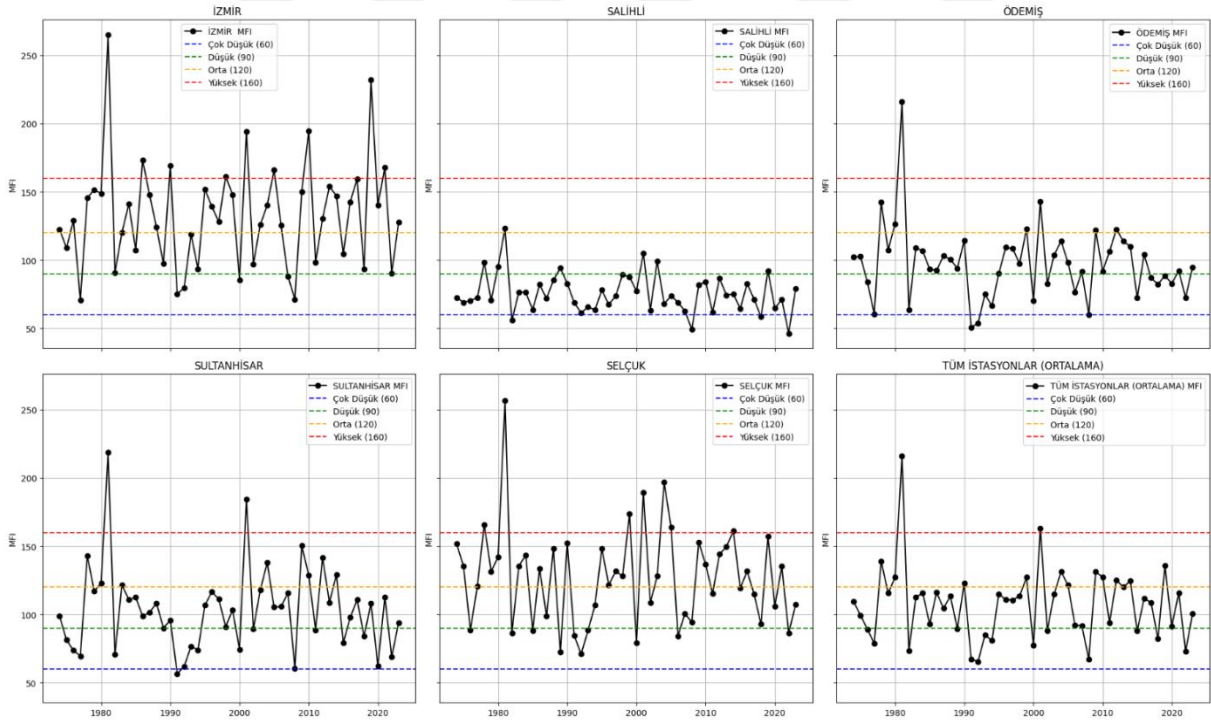
Bu bölümde, Küçük Menderes Nehri Havzası'nda yağış miktarı ve Modifiye Fournier İndeksi (MFI) değişkenlerinin zaman içindeki değişimi, mevsimsel davranışı ve mekânsal dağılımı birlikte değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, havza ve yakın çevresinde yer alan ve 1974–2023 dönemine ait eksiksiz 50 yıllık veriye sahip Ödemiş (17822), Selçuk (17854), İzmir (17220), Salihli (17792) ve Sultanhisar (17850) meteoroloji istasyonlarından elde edilen yağış verileri kullanılmıştır. Uzun dönemli zaman serileri üzerinden aylık ve yıllık ölçekte dağılımlar, mevsimsel değişimler ve uzun dönemli trendler analiz edilmiştir.

4.1.1 Modifiye fournier indisi (MFI) zaman serisi analizi

Çalışma kapsamında, yağışların erozyon potansiyeli üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla Modifiye Fournier İndeksi (MFI) için aylık ve yıllık zaman serisi analizleri gerçekleştirilmiştir. Aylık ve yıllık MFI değerlerinin zaman serisi şeklinde sunulması, hem havza genelindeki yağış erozivitesi özelliklerinin hem de mevsimsel değişimlerin ayrıntılı biçimde incelenmesine imkân sağlamaktadır. Bu kapsamda, istasyonlara ait bireysel MFI serileri ile tüm istasyonların ortalamaları üzerinden aylık ve yıllık zaman serileri sunulmuş; çok düşük, düşük, orta ve yüksek erozivite sınıflarına karşılık gelen eşik değerler bu şekiller üzerinde gösterilmiştir (Şekil 4.1, Şekil 4.2). İstasyon ortalamaları ile tekil istasyon değerleri arasındaki farklılıklar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4.1 : İstasyonlara ait Modifiye Fournier İndisi aylık zaman serileri.



Şekil 4.2 : İstasyonlara ait Modifiye Fournier İndisi yıllık zaman serileri.

Zaman serisi grafiklerinin değerlendirilmesi, MFI değerlerinin yıllar boyunca belirgin bir değişkenlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Özellikle 1981 ve 2001 yıllarında tüm

istasyonlarda dikkat çekici artışlar gözlenmiş, bu yıllar MFI açısından ani ve yüksek değerlerin kaydedildiği dönemler olarak öne çıkmıştır. Buna karşılık, 1991–1994 aralığında ve 2008 yılında etkili olan şiddetli kuraklık koşulları (İpek ve Kahya, 2026), yağış erozivitesinde belirgin azalmaya neden olmuş ve buna bağlı olarak erozivite potansiyelinde önemli düşüşler meydana gelmiştir.

Çizelge 4.1 : Havzada erozyon sınıflarının görülme sayısı (1974-2023).

İstasyon	Düşük (0-60)	Orta (61-90)	Şiddetli (91-120)	Çok Şiddetli (121-160)	Aşırı Şiddetli (>160)
İzmir	0	8	10	23	9
Salihli	4	39	6	1	0
Ödemiş	4	14	25	6	1
Sultanhisar	2	16	22	8	2
Selçuk	0	10	12	21	7

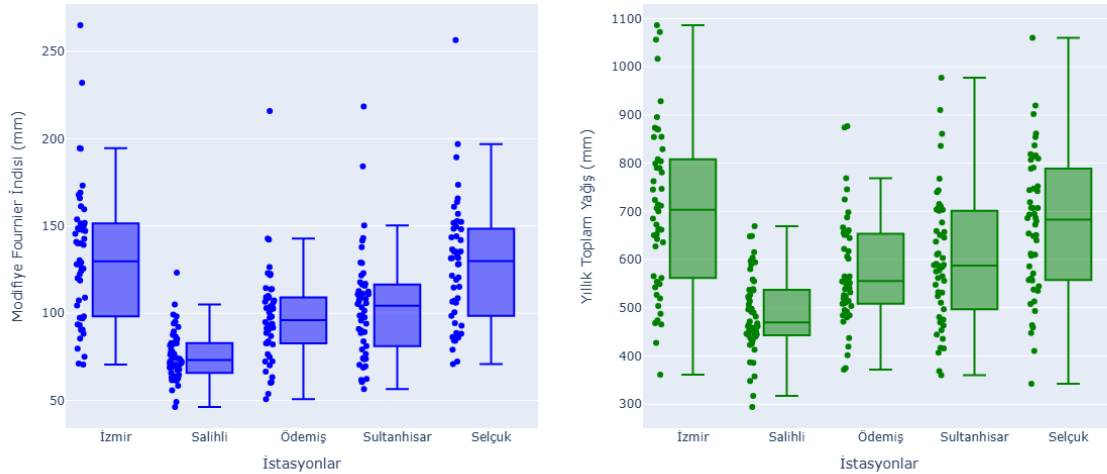
Çalışma kapsamında, 1974–2023 dönemine ait MFI değerlerine dayalı olarak belirlenen erozyon sınıfları Çizelge 4.1’de değerlendirilmiştir (Oduro ve Afriye, 1996). Kıyı kuşağında yer alan İzmir ve Selçuk istasyonları, daha nemli iklim koşulları ve yüksek yağış miktarları ile karakterize edilmekte olup, bu özellikler erozyon sınıflarına da yansımaktadır. Bu istasyonlarda özellikle “çok şiddetli” (121–160) ve “aşırı şiddetli” (>160) erozyon sınıflarında yüksek değerler dikkat çekmektedir. Bu bulgular, kıyı bölgelerinde yoğun yağışların eroziviteyi artırdığını göstermektedir.

Salihli istasyonunda “orta” (61–90) erozyon sınıfında belirgin bir yoğunlaşma gözlenmiş olup, bu durum bölgenin görece daha düşük yağış koşullarına rağmen belirli ölçüde erozyon potansiyeli taşıdığını göstermektedir. Ödemiş ve Sultanhisar istasyonlarında MFI değerlerinin ağırlıklı olarak “şiddetli” (91–120) ve “çok şiddetli” (121–160) kategorilerinde toplandığı belirlenmiştir. Genel olarak, Küçük Menderes Nehir Havzası’nda “orta” ve “şiddetli” erozyon sınıflarının baskın olduğu, “düşük” (0–60) sınıfın ise sınırlı sayıda gözlendiği anlaşılmaktadır. Bu dağılım, havzanın genel olarak erozyona duyarlı bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Yağış erozivitesinin doğası gereği, yağış şiddeti ve rüzgâr yönü gibi değişkenler de önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle, MFI ilişkisinin söz konusu değişkenleri içerecek şekilde geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu durum, özellikle yüksek zamansal çözünürlüklü ve uzun süreli yağış verisine sahip havzalarda daha ayrıntılı değerlendirmeler

yapılmasına imkân tanıyabilir. Ayrıca elde edilen bulgular, gelecekte spektral analiz ve çoklu olasılık dağılımları ile desteklenerek daha geniş bir perspektiften ele alınabilir. Yağış miktarı ve modifiye fournier indeksi (MFI) dağılımlarının mevsimsel analizi

Çalışma kapsamında, havza genelindeki iklimsel ve hidrolojik değişkenliğin daha iyi yorumlanabilmesi amacıyla yıllık ve aylık ölçekte yağış ve Modifiye Fournier İndeksi (MFI) 1974–2023 dönemini kapsayan 50 yıllık veriler kullanılarak aylık ve yıllık ortalama değerler için kutu grafikler oluşturulmuştur (Şekil 4.3).

Yıllık kutu grafikleri, İzmir ve Selçuk istasyonlarının yağış karakteristiği ve MFI değerleri bakımından diğer istasyonlardan belirgin biçimde ayrıldığını göstermektedir. İzmir ve Selçuk istasyonları, yüksek yağış ve MFI değerleriyle birlikte geniş bir değer aralığı sergileyerek birbirine oldukça benzer bir dağılım ortaya koymaktadır. Bu durum, her iki istasyonda da yağış miktarı ve yağış erozivitesinin hem yüksek hem de değişken olduğunu göstermektedir. Buna karşılık Salihli istasyonu, yıllık yağış ve MFI değerlerinin daha düşük seviyelerde seyretmesiyle havza içerisindeki görece daha düşük eroziv ve kurak istasyonlardan biri olarak dikkat çekmektedir.

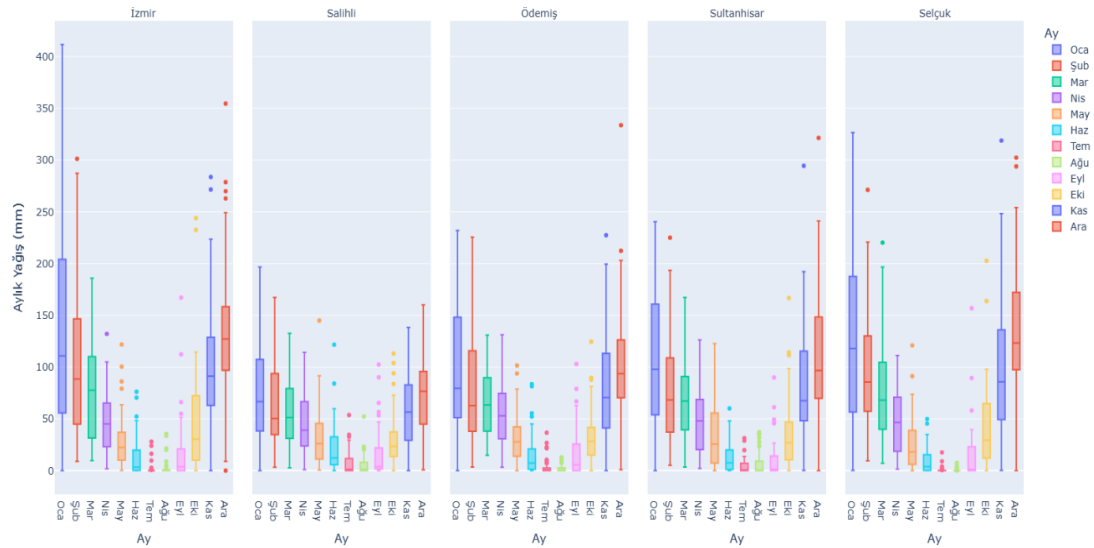


Şekil 4.3 : İstasyon bazında yıllık MFI ve yağış verilerinin kutu grafik gösterimi.

Aylık yağış kutu grafiklerine göre, yağış miktarları ocak, şubat ve aralık aylarında en yüksek seviyelere ulaşırken, yaz aylarında önemli ölçüde azalmaktadır. İzmir ve Selçuk istasyonları, aylık yağış değerleri bakımından da diğer istasyonlara kıyasla daha yüksek değerlere sahiptir. Özellikle İzmir istasyonunda gözlenen ekstrem

değerler, yağışların yalnızca miktar olarak değil, yoğunluk açısından da dikkat çekici olduğunu göstermektedir. Ayrıca İzmir ve Selçuk istasyonlarının denize yakın konumlanması, bu alanlarda yağış rejiminin belirgin biçimde denizel etkiler altında şekillendiğini göstermektedir.

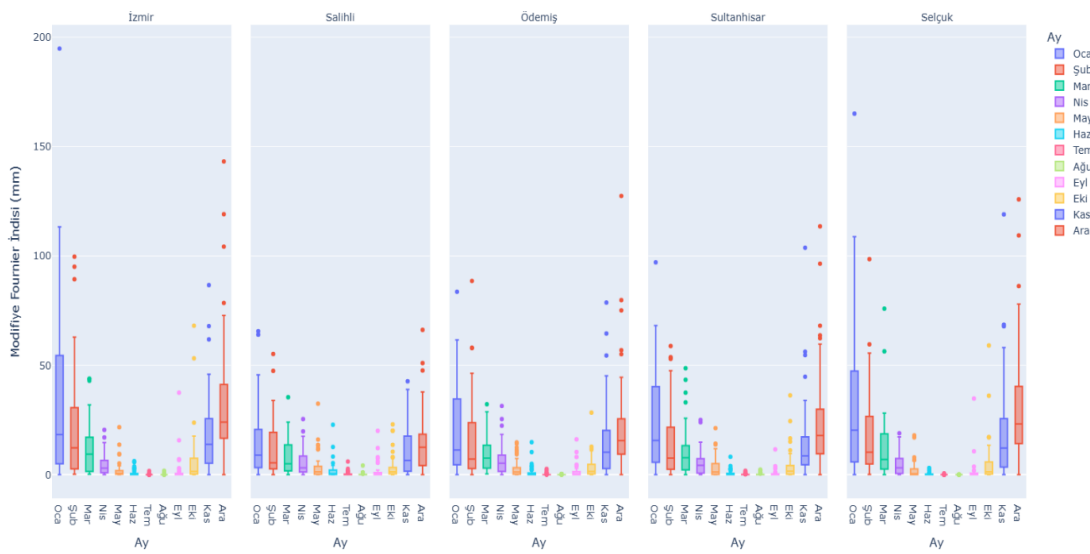
Buna karşın Salihli, Ödemiş ve Sultanhisar istasyonları iç kesimlerde yer almakta ve daha çok karasal iklim özellikleri taşımaktadır. Bu durum, söz konusu istasyonlarda yağış miktarlarının genel olarak daha düşük dağılım göstermesine yol açmaktadır. Bu bulgular, denizel ve karasal iklim koşullarının havza genelindeki yağış rejimi üzerinde etkileyici olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 4.4). Ayrıca, havzanın kıyı kesimlerinde, özellikle İzmir istasyonu gibi yapılaşmanın yoğun olduğu alanlarda, yapılaşmanın yağış rejimi üzerindeki olası etkilerinin gelecek çalışmalarda ayrıca değerlendirilmesi faydalı olabilir.



Şekil 4.4 : İstasyon bazında aylık yağış verilerinin kutu grafiği gösterimi.

Aylık MFI kutu grafikleri, istasyonlar bazında mevsimsel değişkenliğin belirgin biçimde ortaya çıktığını göstermektedir. Tüm istasyonlarda ocak ve aralık aylarında MFI değerlerinin yüksek seviyelere ulaştığı, buna karşılık yaz aylarında belirgin bir azalma gösterdiği görülmektedir. Kış aylarında gözlenen bu yüksek değerler, söz konusu dönemde meydana gelen şiddetli ve yoğun yağışların etkisini yansıtmaktadır. Özellikle İzmir ve Selçuk istasyonlarında bu aylarda kaydedilen yüksek MFI değerleri, bu bölgelerde yağış olaylarının daha yoğun gerçekleştiğine işaret etmektedir.

Haziran, temmuz ve ağustos aylarında ise tüm istasyonlarda MFI değerleri belirgin biçimde düşmekte; bu durum yaz döneminde yağış miktarlarının azalması ve genellikle düşük şiddetli yağışların hâkim olmasıyla ilişkilendirilmektedir. Ayrıca, kış aylarında kutu grafiklerinde sıkça gözlenen aykırı değerler, bazı yıllarda ekstrem yağış olaylarının meydana geldiğini göstermektedir. Bu durum, kış mevsiminde artan yağışlara bağlı olarak erozyon potansiyelinin arttığını ortaya koymaktadır. Bu gözlemler, yağış miktarı ile MFI arasındaki güçlü ilişkiyi desteklemekte ve yağışların arttığı dönemlerde erozivitenin de yükseldiğini doğrulamaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 : İstasyon bazında aylık MFI verilerinin kutu grafiği gösterimi.

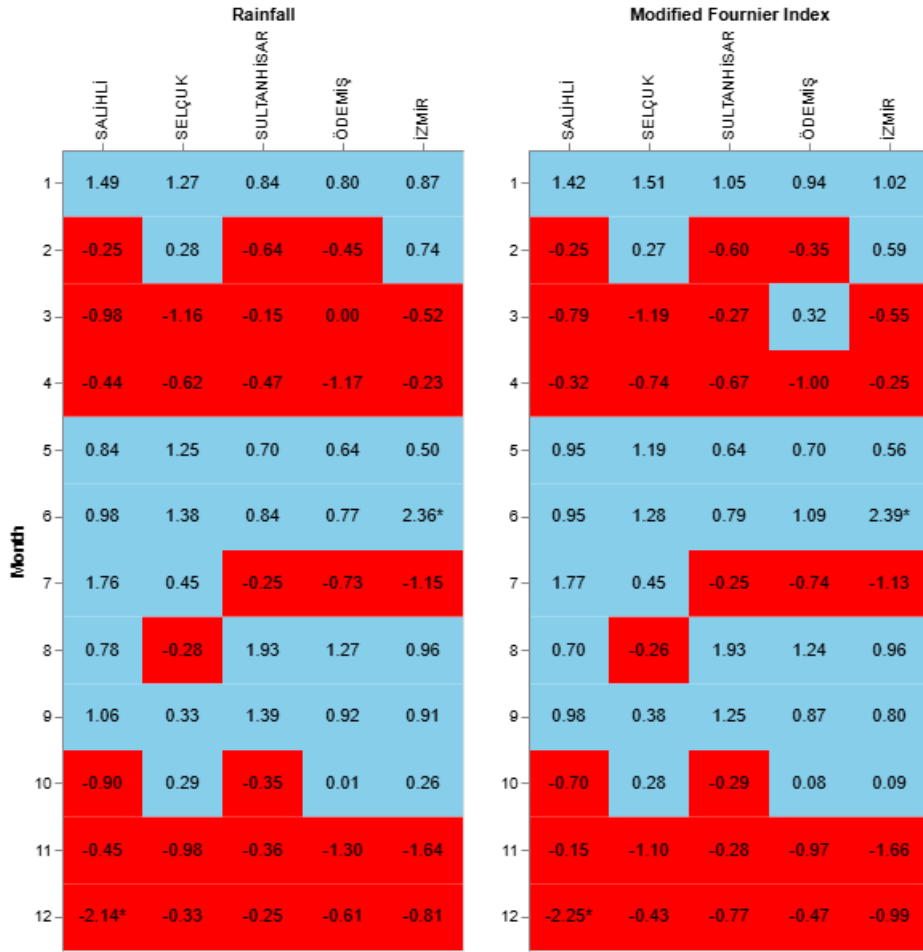
4.1.3 Yağış miktarı ve modifiye fournier indeksi (MFI) zaman serilerinin trend analizi

Çalışma kapsamında, uzun dönemli eğilimlerin analiz edilmesi amacıyla 1974–2023 dönemini kapsayan 50 yıllık yağış ve Modifiye Fournier İndeksi (MFI) verileri kullanılarak Modifiye Mann-Kendall trend testi yöntemiyle trend analizleri gerçekleştirilmiştir. Sezonal etkileri azaltmak amacıyla hem aylık hem de yıllık ölçekte değerlendirmeler yapılmıştır. Sezonal etkilerden arındırma işlemi, her bir ayın kendi zaman serisi içinde ayrı ayrı analiz edilmesi yoluyla sağlanmış; böylece yılın farklı dönemlerine özgü etkilerin genel eğilimleri bastırması önlenmiştir.

Çalışmanın temel amacı, bölgedeki yağış ve MFI serilerinde anlamlı trendlerin varlığını belirlemek ve bu iki değişkenin eğilimleri arasındaki ilişkiyi ortaya koymaktır. Bu kapsamda, otokorelasyon etkisini dikkate alan Modifiye Mann-Kendall

yöntemi kullanılmıştır. Her bir ay ve yıl için yapılan analizlerde trendlerin istatistiksel anlamlılığı Z istatistiği ile değerlendirilmiş; $|Z| > 1.96$ koşulunu sağlayan durumlar %95 güven düzeyinde anlamlı kabul edilmiştir. Elde edilen bulgular, Küçük Menderes Nehri Havzası'nda yağış ve MFI trendlerinin zamansal ve mekânsal dağılımını ortaya koyması açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

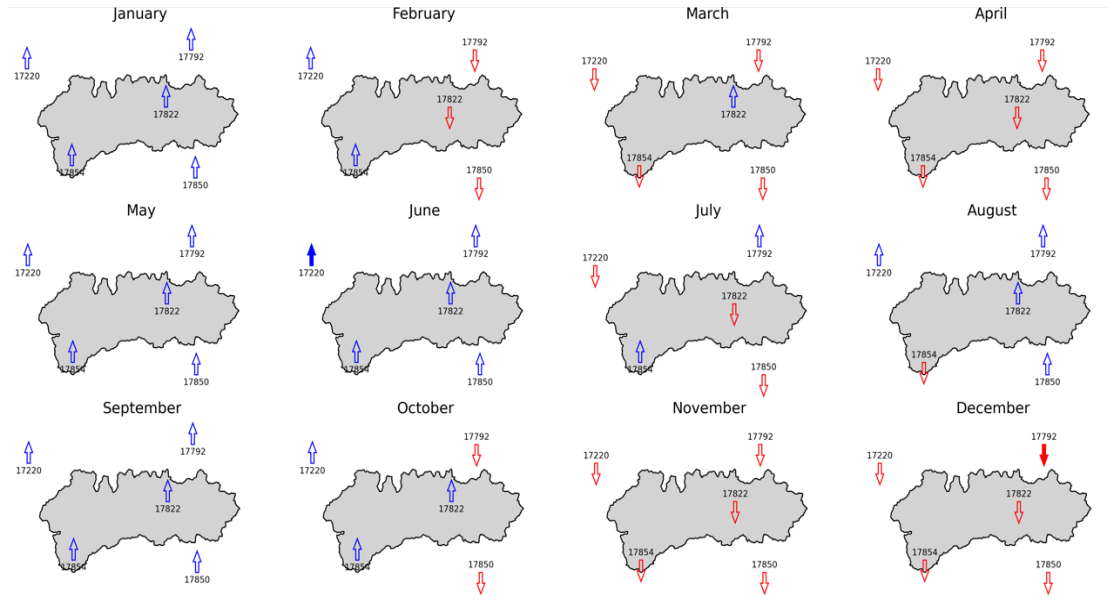
Analiz sonuçlarına göre, yağış ve MFI trendleri havza genelinde büyük ölçüde benzer paternler sergilemiştir. Artan trendler mavi, azalan trendler ise kırmızı renklerle gösterilmiş; istatistiksel olarak anlamlı eğilimler yıldız işareti ile belirtilmiştir. Yağış ve MFI serileri arasındaki bu paralel eğilimler, her iki değişkenin benzer iklimsel ve çevresel süreçlerden etkilendiğini göstermektedir. Örneğin, İzmir istasyonunda haziran ayında hem yağış hem de MFI için artan ve istatistiksel olarak anlamlı trendler tespit edilmiştir. Salihli istasyonunda ise aralık ayında anlamlı azalan trendler belirlenmiştir. Genel olarak, yaz aylarında artan trendlerin daha yaygın olduğu, buna karşılık kış aylarında azalan trendlerin öne çıktığı görülmektedir. Bu durum, havzanın yağış rejiminde mevsimsel farklılıkların belirgin olduğunu ve bu değişimin erozivite üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymaktadır (Şekil 4.6).



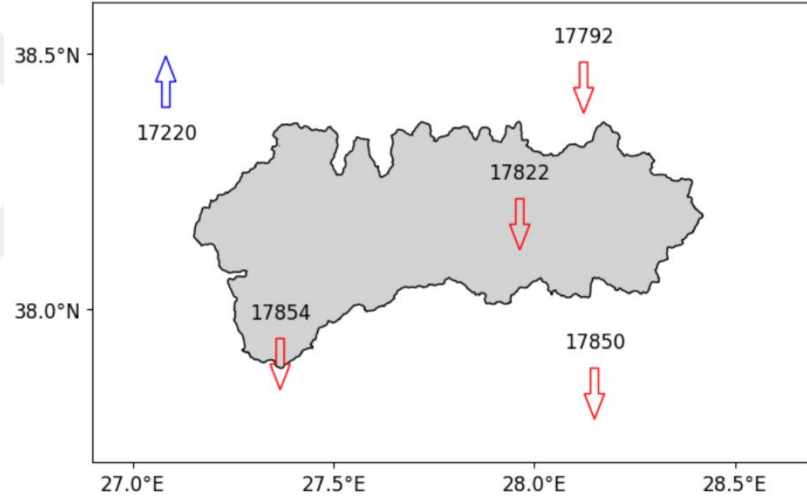
Şekil 4.6 : Aylık yağış miktarı ve MFI trendlerinin karşılaştırılması.

Çalışma kapsamında elde edilen bulgular, mekânsal haritalar ile desteklenmiştir. Bu haritalarda mavi oklar artan, kırmızı oklar ise azalan trendleri temsil ederken; içi dolu oklar istatistiksel olarak anlamlı, içi boş oklar ise anlamlı olmayan eğilimleri göstermektedir.

Haritalar incelendiğinde, bazı dönemlerde istasyonlar arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. Örneğin, şubat ayında havzanın batı kesimlerinde artan eğilimler öne çıkarken, doğu kesimlerde azalan eğilimlerin baskın olduğu dikkat çekmektedir. Kış ayları genelinde azalan trendlerin havza genelinde daha yaygın bir patern sergilediği görülmüştür. Bu bulgular, havza genelinde tekdüze bir değişimden ziyade, yerel koşulların trendlerin yönü ve şiddeti üzerinde belirleyici olabileceğine işaret etmektedir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7 : Aylık Modifiye Fournier İndisi trend haritaları.



Şekil 4.8 : Yıllık Modifiye Fournier İndisi trend haritası.

Elde edilen bulgular, istasyonlar arasında yağış miktarı ve Modifiye Fournier İndeksi (MFI) trendlerinin büyük ölçüde istatistiksel olarak anlamlı bir değişim göstermediğini ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, bazı aylar ve istasyonlar özelinde tespit edilen anlamlı eğilimler ile özellikle yaz ve kış mevsimlerinde gözlenen farklı yönlü trendler, havzada belirgin bir mevsimsel değişkenliğin etkili olduğunu göstermektedir. Buna ek olarak, gelecek çalışmalarda, Sequential Mann-Kendall algoritması gibi farklı trend yöntemlerinin uygulanması, trendlerin başlangıç noktaları ve değişim dönemlerinin daha ayrıntılı incelenmesine olanak tanıyabilir (Goossens ve Berger, 1986; Karaca ve diğ., 1995).

4.2 İklim Değişikliği Senaryoları Altında Toprak Erozyonu Projeksiyonları

Bu bölümde, Küçük Menderes Nehri Havzası'nda iklim değişikliğinin toprak erozyonu üzerindeki olası etkileri, RUSLE modeli ile CMIP6 tabanlı iklim projeksiyonları birlikte kullanılarak değerlendirilmiştir. Analizler kapsamında, havzaya en uygun yağış erozivitesi denklemi belirlendikten sonra RUSLE faktörleri hesaplanmış; SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları altında farklı gelecek dönemler için toprak kaybı projeksiyonları üretilmiştir. Elde edilen çıktılar, zamansal değişim ve mekânsal dağılım açısından analiz edilmiştir.

4.2.1 Yağış erozivite (R) faktörü denklemi seçimi

Gözlemsel veri setlerinde dakikalık yağış verileri gibi yüksek zamansal çözünürlüğe sahip yağış kayıtlarının çoğu zaman bulunmadığı bilinmektedir (Biasutti ve Seager, 2015). Bu kısıt, yaygın olarak kullanılan iklim projeksiyon veri setleri için de geçerli olup, yağış erozivite faktörünün (R) hesaplanmasında doğrudan EI_{30} temelli yöntemlerin uygulanmasını sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, mevcut daha düşük zamansal çözünürlüklü yağış verilerinden yararlanılarak R-faktörünün tahmin edilebilmesine olanak sağlayan uygun bir ampirik denklemin seçilmesi gerekmektedir.

Bu kapsamda, Küçük Menderes Nehri Havzası ve yakın çevresinde yer alan, bölgenin iklimsel özelliklerini temsil edebilen ve yeterli uzunlukta yağış gözlem serileri ile EI_{30} verilerine sahip toplam 17 meteoroloji istasyonu değerlendirmeye alınmıştır (Şekil 1). EI_{30} değerleri, Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir (Erpul ve diğ., 2018). Her bir istasyon için, literatürde yaygın olarak kullanılan 10 farklı ampirik denklem yardımıyla R-faktörü hesaplanmış ve bu değerler EI_{30} tabanlı R sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.2). Hesaplamalarda, yıllık ortalama yağışı temsil eden P (mm) ve Arnoldus (1977) tarafından geliştirilen Modifiye Fournier İndeksi (MFI) kullanılmıştır. Modeller arası karşılaştırmanın tutarlılığını sağlamak amacıyla yalnızca ortak gözlem yılları dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.2 : R-faktörünün tahmininde kullanılan ampirik denklemler.

Model	Matematiksel Denklem
Wischmeier ve Smith (1978)	$R = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N [\sum_{k=1}^m (E)(I_{30})_k]_j$
Arnoldus (1977)	$R = 0.264 \cdot \text{MFI}^{1.50}$
Arnoldus (1980)	$R = 1.735 \cdot 10^{(1.5 \cdot \log_{10}(\text{MFI}) - 0.8188)}$
Schwertmann ve diğ. (1990)	$R = 0.83 \cdot P - 17.7$
Renard ve Freimund (1994)	$R = \begin{cases} 0.0483 \cdot P^{1.610}, & P < 850 \\ 587.8 - 1.219 \cdot P + 0.004105 \cdot P^2, & P \geq 850 \end{cases}$
Ferrari ve diğ. (2005a) (Üstel)	$R = 0.092 \cdot P^{1.4969}$
Ferrari ve diğ. (2005b) (Lineer)	$R = 4.0412 \cdot P - 965.53$
Torri ve diğ. (2006)	$R = 3.08 \cdot P - 944$
Choudhury ve Nayak (2003)	$R = 79 + 0.363 \cdot P$
Hurni (1985)	$R = 0.562 \cdot P - 8.12$
Babu ve diğ. (2004)	$R = \{81.5 + 0.375 \cdot P, \quad 340 \leq P \leq 3500\}$

Ampirik modellerin performansı, tahmin edilen ve gözlenen değerler arasındaki ortalama sapmayı ifade eden Yüzde Sapma (PBIAS) ölçütü kullanılarak değerlendirilmiştir (Gupta ve diğ, 1999). PBIAS, hidrolojik model performansının nicel olarak değerlendirilmesinde önerilen bir ölçüt olup (Moriasi ve diğ, 2007), korelasyon temelli istatistiklerin aksine sistematik yanlılığı daha iyi yansıtmaktadır. Korelasyon katsayıları doğrusal ilişkiyi ortaya koysa da, uç değerlere duyarlı olmaları ve oransal veya mutlak farkları yeterince temsil edememeleri nedeniyle uzun dönem ortalama değerlerin karşılaştırılmasında sınırlı kalmaktadır (Legates ve McCabe, 1999). Bu nedenle, uzun dönem ortalama yağış erozivitesini temsil eden R-faktörü için PBIAS metriği tercih edilmiştir.

İstasyonlar arasında veri uzunluğundaki farklılıkların sonuçlar üzerindeki etkisini azaltmak amacıyla istasyon bazlı ortalama yaklaşımı uygulanmıştır. Buna göre, her bir istasyon için 2004–2023 dönemine ait ortalama R-faktörü hesaplanmış, ardından PBIAS değeri bu 17 istasyon ortalaması üzerinden belirlenmiştir. Böylece, veri sürelerindeki farklılıklardan bağımsız olarak tüm istasyonların analize eşit katkı sağlaması amaçlanmıştır (Çizelge 4.3). Bu çalışmada R-faktörü projeksiyonları CMIP6 grid verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, istasyon gözlemlerine dayalı R-faktörü analizlerinin yapıldığı havzalarda Thiessen poligonu veya izohyet gibi klasik ağırlıklı ortalama yöntemlerinin uygulanması, ortalama hesaplarının hassasiyetini artırabilir (Dingman, 2015).

Çizelge 4.3 : R faktörünün tahmininde kullanılan ampirik denklemlerin performansı.

Model	PBIAS (%)	17 İstasyon Ortalaması
Wischmeier ve Smith (1978)	Referans	956
Arnoldus (1977)	-68.88	299
Arnoldus (1980)	-69.78	298
Schwertmann ve diğ. (1990)	-50.61	474
Renard ve Freimund (1994)	52.11	1460
Ferrari ve diğ. (2005a) (Üstel)	39.02	1334
Ferrari ve diğ. (2005b) (Lineer)	48.86	1429
Torri ve diğ. (2006)	-8.23	881
Choudhury ve Nayak (2003)	-69.36	294
Hurni (1985)	-66.16	325
Babu ve diğ. (2004)	-67.95	308

Analiz sonuçları, Torri ve diğ. (2006) tarafından geliştirilen modelin –8.23% PBIAS değeri ile en düşük yanlılığı gösterdiğini ve diğer ampirik eşitliklere kıyasla en iyi performansı sergilediğini ortaya koymuştur. Akdeniz iklim koşulları altında yıllık yağış ile erozivite arasındaki ilişkiyi temel alan bu model, başlangıçta Toskana, Abruzzi ve Lucania bölgeleri için geliştirilmiş olup güçlü bir doğrusal ilişki sunmaktadır ($r^2 = 0.768$, $n = 88$). Küçük Menderes Nehri Havzası da yağışlı kışlar,

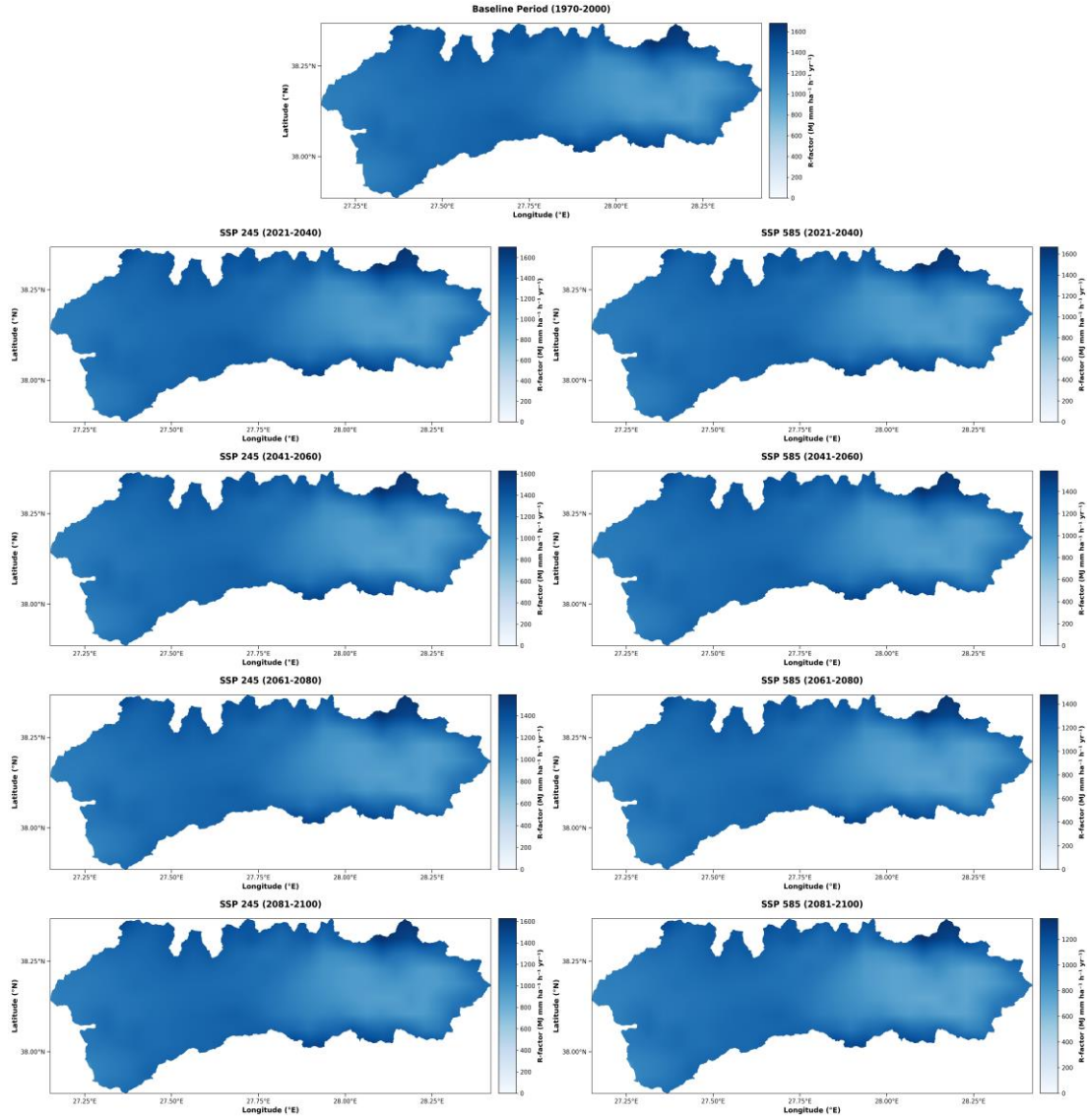
kurak yazlar ve özellikle sonbahar aylarında görülen şiddetli yağışlar ile benzer iklimsel özellikler göstermektedir.

17 istasyon için hesaplanan ortalama $R-EI_{30}$ değeri $956 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{yıl}^{-1}$ iken, Torri ve diğ. (2006) modeli ile elde edilen ortalama değer $881 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{yıl}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, modelin gözlenen değerlere oldukça yakın sonuçlar verdiğini göstermektedir. İstatistiksel performansı, iklimsel uyumu ve düşük zamansal çözünürlüklü iklim verileriyle uygulanabilirliği göz önünde bulundurularak, bu çalışmada geleceğe yönelik R-faktörü hesaplamalarında Torri ve diğ. (2006) modeli tercih edilmiştir.

4.2.2 RUSLE modeli parametrelerinin analizi

RUSLE modeli, havza ölçeğinde toprak kaybının hesaplanmasına ve erozyon açısından hassas alanların belirlenmesine olanak sağlayan yaygın bir yaklaşımdır. Bu çalışmada, Küçük Menderes Nehri Havzası için RUSLE modelinin beş temel girdi faktörü (R, K, LS, C ve P) elde edilmiştir.

Yağış erozivite faktörü (R faktör) haritaları, havza için en uygun denklem olarak belirlenen Torri ve diğ. (2006) yaklaşımı kullanılarak oluşturulmuştur. R faktörü, iki farklı sosyoekonomik senaryo (SSP2-4.5 ve SSP5-8.5) altında dört gelecek dönem (2021–2040, 2041–2060, 2061–2080 ve 2081–2100) için hesaplanmış ve RUSLE modeline entegre edilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9 : Küçük Menderes Nehri Havzası’nda farklı iklim senaryoları ve dönemler için R faktörünün mekânsal dağılımı.

Havzanın yağış erozivitesi potansiyelindeki zamansal değişimler, 1970–2000 dönemini temsil eden referans değerlerle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Referans döneme ait ortalama R faktörü ($1250.4 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$), istasyon verilerinden kaynaklanabilecek olası yanlışlıkları azaltmak amacıyla, istasyon gözlemleri yerine WorldClim v2.1 ızgara tabanlı iklim verileri kullanılarak hesaplanmıştır. SSP2-4.5 senaryosu altında R faktörü değerlerinin yüzyıl boyunca sınırlı dalgalanmalar gösterdiği ve değişimlerin $+\%1.7$ ile $-\%5.8$ aralığında kaldığı görülmüştür. 2021–2040 döneminde 1276.1’e yükselen R değeri, 2061–2080 döneminde 1177.9’a düşmüş ve yüzyıl sonunda 1205.3 seviyesine ulaşmıştır. Bu sonuçlar, kısa vadeli bir artışı

takiben orta düzeyli bir azalma ile karakterize edilen görece dengeli bir erozivite davranışına işaret etmektedir.

Buna karşılık, SSP5-8.5 senaryosu altında belirgin bir azalma eğilimi ortaya çıkmıştır. R faktörü 2021–2040 döneminde 1236.8 iken, izleyen dönemlerde sırasıyla 1177.8, 1082.2 ve 986.6 değerlerine gerilemiş ve referans döneme göre %5.8 ile %21.1 arasında değişen azalmalar hesaplanmıştır (Çizelge 4.4). Bu azalma eğilimi, havza genelinde eroziv yağış olaylarının sayısındaki ve toplam yağış miktarındaki düşüş ile ilişkilendirilmektedir. Birçok GCM çıktısında öngörülen yıllık yağış azalımı da bu durumu desteklemektedir. Dolayısıyla, SSP2-4.5 senaryosunda yağış şiddeti ve sıklığı arasındaki denge büyük ölçüde korunurken, SSP5-8.5 senaryosunda yağış sıklığındaki azalma, olası şiddet artışlarının önüne geçmektedir. Ayrıca, tüm projeksiyon haritalarında kıyı kesimlerinden iç bölgelere doğru azalan bir R faktörü dağılımı dikkat çekmektedir.

Elde edilen R faktör değerleri, Panagos ve diğ. (2017) tarafından Türkiye'nin Ege Bölgesi için tespit edilen $700\text{--}1150 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$ aralığı ile uyumludur. Bu durum, çalışmanın bulgularının literatürle tutarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Benzer şekilde, Türkiye'nin batı kesimlerini ve Ege Havzası'nı kapsayan projeksiyon çalışmaları da geleceğe yönelik R faktörü değerleri için benzer eğilimler tespit etmiştir. Örneğin, Chen ve diğ. (2024), CMIP6 tabanlı projeksiyonlar kullanarak 2041–2060 ve 2081–2100 dönemlerinde genel olarak %15'in altında azalmalar, SSP5-8.5 senaryosu altında ise 2081–2100 döneminde %15'i aşan düşüşler tespit etmiştir.

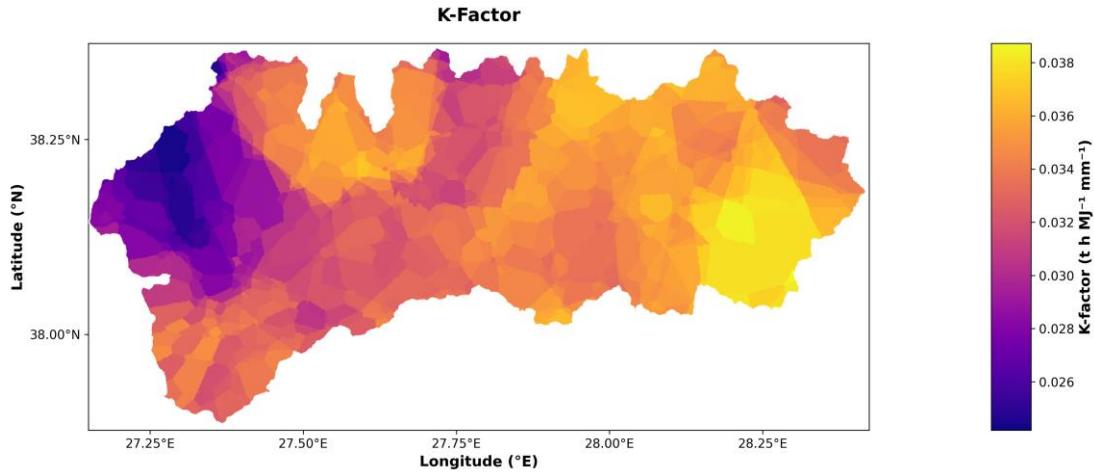
Benzer şekilde, Panagos ve diğ. (2022), 2050–2070 dönemi için hem RCP4.5 hem de RCP8.5 senaryoları altında %15'in altında azalmalar öngörmüştür. Kilic ve Gunal (2021) ise Ege Bölgesi için RCP8.5 senaryosu altında 2070 yılına kadar yağış erozivitesinde %16.29 (MIROC5) ile %33.97 (CCSM4) arasında değişen azalmalar tahmin etmiştir.

Doğu Akdeniz'in diğer bölgelerinde de benzer mekanizmalar tespit edilmiştir. Örneğin, Grillakis ve diğ. (2020), Girit Adası için bazı gelecek senaryoları altında yağış erozivitesinde azalma öngörmüş ve özellikle RCP8.5 senaryosunda bu azalmanın, eroziv olay sayısındaki düşüş ile olay şiddetindeki artışın bileşik etkisinden kaynaklandığını belirtmiştir. Çalışmada, yakın gelecekte tüm senaryolar için eroziv olay sayısının yaklaşık %5 oranında azalacağı, buna karşın olay şiddetinde özellikle

RCP8.5 altında sınırlı bir artış olacağı ortaya konmuştur. Uzak gelecekte ise, erozif olay sayısındaki azalmanın RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında %15–25 aralığına ulaştığı, buna karşın olay şiddetindeki değişimin sınırlı kaldığı ve yalnızca RCP4.5 senaryosu altında %3–5 düzeyinde hafif bir artış gösterdiği belirtilmiştir.

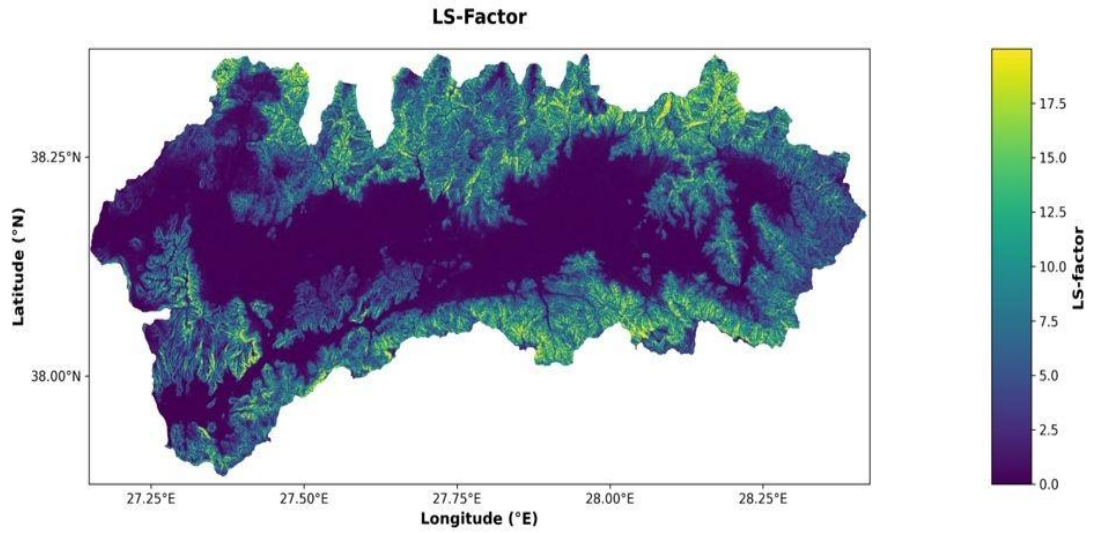
Bu sonuçlar, olay sıklığı ve şiddetindeki zıt eğilimlerin birlikte yağış erozivitesindeki net değişimi belirlediğini ortaya koymaktadır. Küçük Menderes Nehri Havzası'nda SSP2-4.5 altında erozivitenin görece durağan kalması ve SSP5-8.5 altında belirgin düşüşler göstermesi, Doğu Akdeniz havzalarında benzer süreçlerin etkili olabileceğine işaret etmektedir.

Toprak erozyon duyarlılık faktörü (K faktör), havza genelinde 0.02–0.04 t ha h ha⁻¹ MJ⁻¹ mm⁻¹ aralığında değişmekte olup, ortalama K değeri 0.03 olarak hesaplanmıştır (Şekil 4.10). Düşük K değerleri erozyona daha dirençli toprakları, yüksek değerler ise yağış ve yüzey akışına karşı daha hassas toprakları temsil etmektedir. K faktöründeki dar değer aralığı, havza genelinde toprak erodibilitesinin büyük ölçüde benzer özellikler gösterdiğini ortaya koymaktadır.



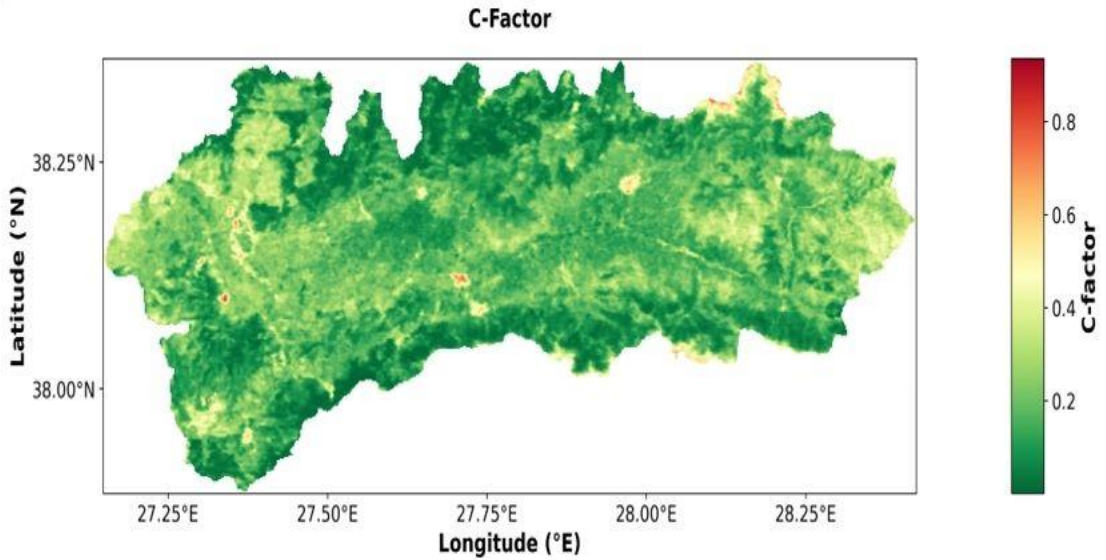
Şekil 4.10 : Toprak erozyon duyarlılık (K) faktörünün mekânsal dağılımı.

Eğim uzunluğu ve eğim dikliği faktörü (LS faktör), havza genelinde 0.00 ile 49.48 arasında değişmekte olup, ortalama LS değeri 4.58 olarak hesaplanmıştır. Topoğrafik sınıflandırmaya göre havzanın %44.3'ü düz alanlardan (LS: 0–1), %19.8'i hafif eğimli alanlardan (LS: 1–5), %33.9'u eğimli yamaçlardan (LS: 5–20) ve %2.0'ı çok eğimli alanlardan (LS>20) oluşmaktadır. Yüksek LS değerleri, özellikle kuzey ve güneydeki dağlık kesimlerde yoğunlaşırken; batıdaki ovalar ve iç kesimler düşük LS değerleriyle öne çıkmaktadır (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 : Eğim uzunluğu ve eğim dikliği (LS) faktörünün mekânsal dağılımı.

Bitki örtüsü ve arazi kullanımını temsil eden C faktörü değerleri 0.001 ile 0.94 arasında değişmekte olup, havza genelindeki ortalama değer 0.18'dir (Şekil 4.12). CORINE Arazi Örtüsü verilerine göre (İpek ve Kahya, 2026), düşük C faktörü değerleri kuzey ve güney kesimlerde yoğunlaşan ormanlık alanları temsil ederken, daha yüksek değerler tarım alanları, seyrek bitki örtüsüne sahip bölgeler ve kuzeybatıdaki kentsel alanlarda gözlenmiştir.

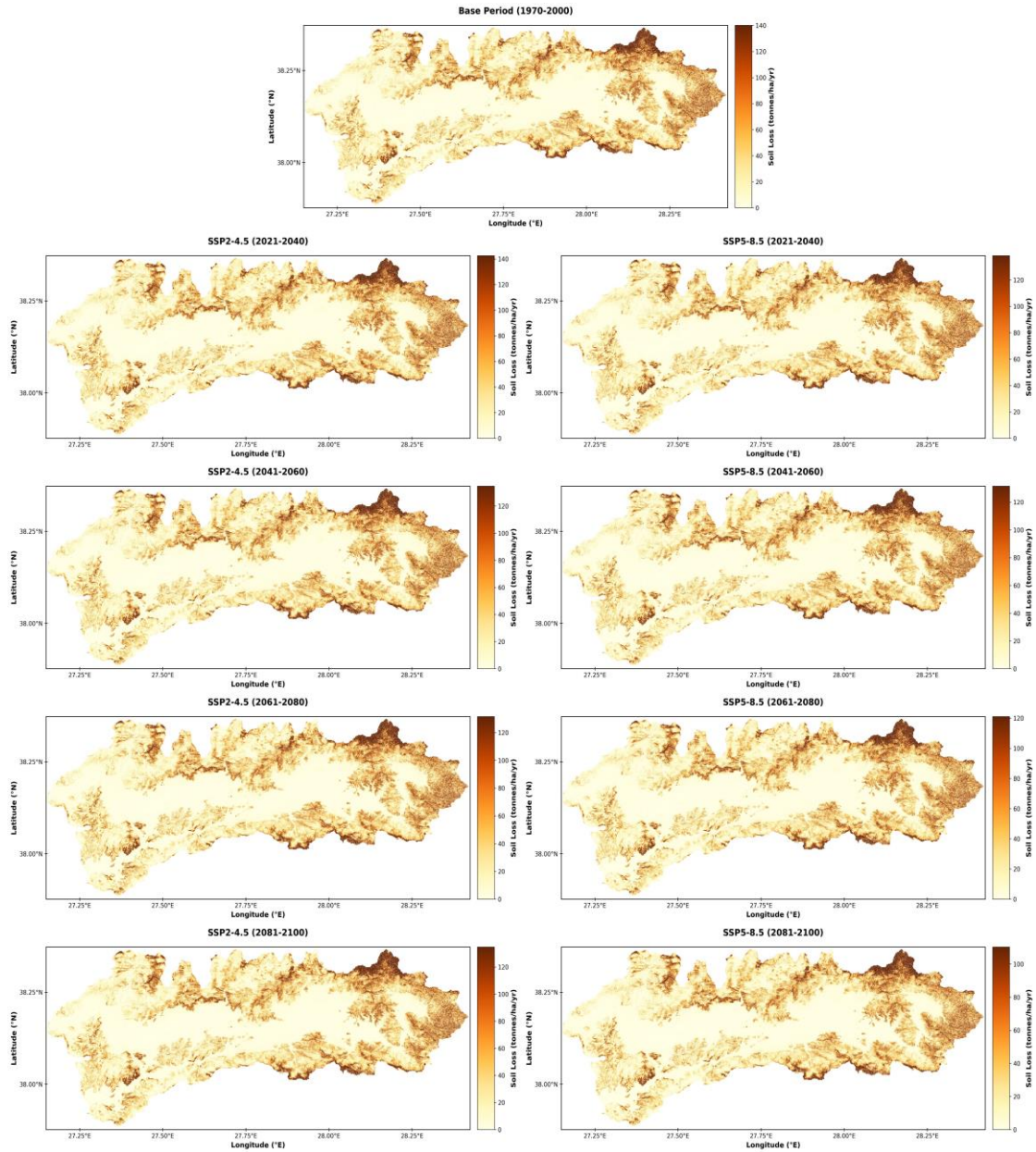


Şekil 4.12 : Arazi Kullanım (C) Faktörünün mekânsal dağılımı.

Son olarak, havza genelinde toprak koruma uygulamalarına ilişkin yeterli veri bulunmaması nedeniyle tüm havza için P faktörü 1 olarak kabul edilmiştir.

4.2.3 RUSLE tabanlı toprak erozyonu projeksiyonları ve sediment verimi tahmini

RUSLE modeline ait tüm faktörlerin bütünleştirilmesinin ardından, referans dönem ve gelecek iklim senaryoları için havza genelinde yıllık toprak kaybı haritaları üretilmiştir (Şekil 4.13). Referans dönem (1970–2000) için ortalama yıllık toprak kaybı $29.56 \text{ t ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.13 : RUSLE senaryolarına göre tahmin edilen toprak kaybının mekânsal dağılımı.

SSP2-4.5 senaryosu altında, yakın gelecekte 2021–2040 periyodunda toprak kaybında %1.7 oranında sınırlı bir artış gözlenmiş ve ortalama değer $30.07 \text{ t ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$ 'e

ulaşmıştır. İzleyen dönemlerde ise toprak kaybında küçük dalgalanmalar meydana gelmiş; 2041–2060 döneminde $28.45 \text{ t ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$, 2061–2080 döneminde $27.80 \text{ t ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$ değerleri hesaplanmış, yüzyılın sonuna doğru 2081–2100 döneminde ise tekrar $28.46 \text{ t ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$ seviyesine yükselmiştir. Bu sonuçlar, orta emisyon senaryosu altında havzanın uzun vadeli erozyon potansiyelinin genel olarak istikrarlı bir seyir izlediğini göstermektedir.

Buna karşılık, yüksek emisyonlu SSP5-8.5 senaryosunda toprak kaybında daha belirgin bir azalma eğilimi ortaya çıkmıştır. 2021–2040 döneminde ortalama toprak kaybı $29.21 \text{ t ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$ olarak hesaplanırken, izleyen dönemlerde bu değer sırasıyla 27.79, 25.60 ve $23.37 \text{ t ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$ 'e gerilemiştir. Bu değişimler, referans döneme kıyasla %1.2 ile %20.9 arasında değişen azalışlara karşılık gelmektedir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4 : Farklı iklim senaryoları altında RUSLE ortalama R-faktörü ve yıllık toprak kaybı değerleri.

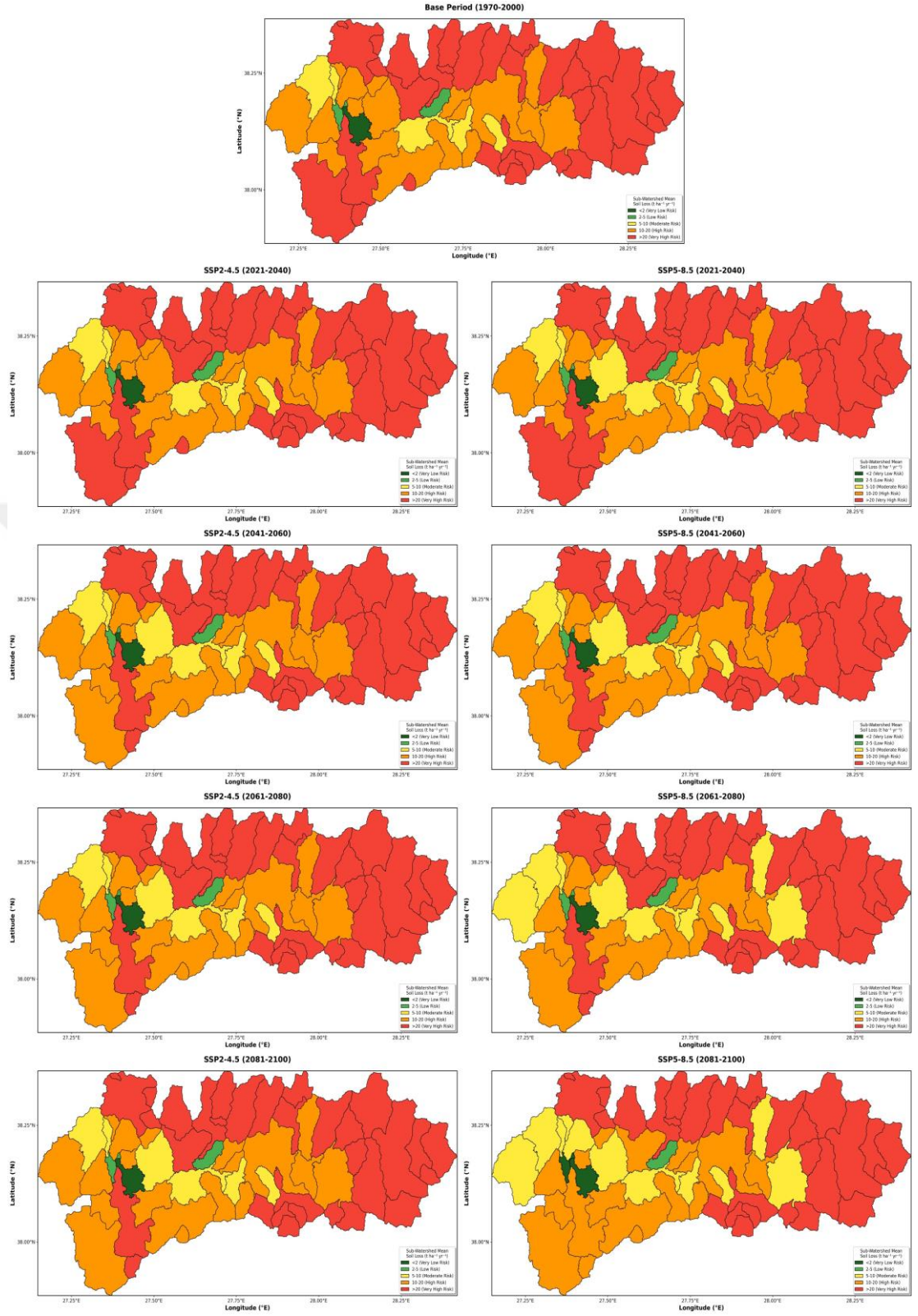
Periyot	Senaryo	R-Factor ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$)	Toprak Kaybı (ton/ha/yıl)
1970-2000	-	1250.4	29.56
2021-2040	SSP245	1276.1	30.07
2021-2040	SSP585	1236.8	29.21
2041-2060	SSP245	1204.2	28.45
2041-2060	SSP585	1177.8	27.79
2061-2080	SSP245	1177.9	27.80
2061-2080	SSP585	1082.2	25.60
2081-2100	SSP245	1205.3	28.46
2081-2100	SSP585	986.6	23.37

Küçük Menderes Nehri Havzası'nın 3528.71 km^2 'lik drenaj alanı ve RUSLE ile tahmin edilen $29.56 \text{ t ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$ ortalama yıllık toprak kaybı dikkate alınarak sediment taşınım oranı (SDR) %23 olarak hesaplanmıştır. Bu değer, literatürde ifade edilen ve genellikle %13 ile %40 arasında değişen sediment iletim oranlarıyla uyumludur (Ouillon, 2018; Walling ve Webb 1996). Bu orana bağlı olarak, havza çıkışına ulaşan yıllık ortalama sediment verimi yaklaşık $6.81 \text{ t ha}^{-1} \text{ yıl}^{-1}$ olarak tahmin edilmiştir.

4.2.4 Alt havza ölçeğinde erozyon riskinin değerlendirilmesi

Bu çalışmada, farklı iklim senaryoları altında, alt havza ölçeğinde, yıllık ortalama toprak kaybı değerlerine göre 60 alt havza, beş farklı erozyon riski sınıfında değerlendirilmiştir. Erozyon risk sınıfları; 2 t ha⁻¹ yıl⁻¹'den düşük değerler için çok düşük, 2–5 t ha⁻¹ yıl⁻¹ aralığı için düşük, 5–10 t ha⁻¹ yıl⁻¹ aralığı için orta, 10–20 t ha⁻¹ yıl⁻¹ aralığı için yüksek ve 20 t ha⁻¹ yıl⁻¹'in üzerindeki değerler için çok yüksek risk olarak tanımlanmıştır (Koralay ve Kara, 2025) (Şekil 4.14).





Şekil 4.14 : Farklı iklim senaryoları altında alt havza erozyon risk sınıflarının dağılımı.

Alt havza ölçeğinde gerçekleştirilen risk sınıflandırması, erozyon risk dağılımının geleceğe yönelik iklim senaryoları boyunca büyük ölçüde korunduğunu ve zamansal değişimin sınırlı kaldığını göstermektedir. Referans dönem (1970–2000) incelendiğinde, havzanın önemli bir bölümünde ciddi erozyon riski bulunduğu görülmektedir. Bu dönemde alt havzaların %30'u yüksek, %56.7'si ise çok yüksek risk sınıfında yer alırken; kalan alanlar orta (%8.3), düşük-orta (%3.3) ve düşük (%1.7) risk sınıflarından oluşmuştur.

SSP2-4.5 senaryosu altında, söz konusu risk oranlarının yüzyıl boyunca büyük ölçüde değişmeden kaldığı belirlenmiştir. Düşük ve düşük-orta risk sınıfları sırasıyla %1.7 ve %3.3 oranlarını korurken, orta risk sınıfı %8.3–10.0 aralığında sınırlı dalgalanmalar göstermiştir. Benzer şekilde, çok yüksek risk sınıfı %53.3 ile %56.7 arasında değişerek görece istikrarlı bir dağılım sergilemiştir.

SSP5-8.5 senaryosu altında da yüzyılın büyük bölümünde (2021–2080) risk dağılımının referans dönem ve SSP2-4.5 senaryosu ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Bu dönemlerde düşük ve düşük-orta risk sınıflarının toplam oranı %1.7–3.3 aralığında kalmış, orta risk sınıfı ise %10.0–15.0 arasında sınırlı değişimler sergilemiştir. Ancak yüzyılın son döneminde (2081–2100) bu genel eğilimden belirgin bir sapma ortaya çıkmıştır. Bu dönemde çok yüksek risk sınıfının oranı %48.3'e gerilerken, orta risk sınıfı %18.3'e yükselmiş ve bu dönem havza genelinde risk dağılımının anlamlı biçimde farklılaştığı tek zaman aralığı olmuştur.

Genel olarak, SSP5-8.5 senaryosunun son döneminde sınırlı bir değişim gözlenmesine rağmen, erozyon risk sınıflarının havza genelinde büyük ölçüde korunduğu görülmektedir. Tüm senaryolar boyunca yüksek ve çok yüksek risk sınıfları havzanın önemli bir bölümünü kapsamaya devam etmiş; bu alanlar ağırlıklı olarak yüksek LS faktör değerlerine sahip, dik eğimli ve yüksek kotlu alt havzalarda yoğunlaşmıştır. Doğudan batıya doğru dağlık alanlardan düşük eğimli ovalara geçiş gösteren havza topoğrafyası ile uyumlu olan bu mekânsal desen, kuzey ve güneydeki dağlık bölgelerde de belirgin biçimde izlenmektedir.

Önceki çalışmalar, erozyon şiddetinin eğim yönü ve topoğrafik konum gibi faktörlere bağlı olarak değişebildiğini ortaya koymuştur (Tuo ve diğ, 2023; Uge ve diğ, 2022; Menghis ve diğ, 2025; Liu ve diğ, 2024). Bu bulgularla tutarlı olarak, bu çalışmada da yüksek risk sınıflarının çoğunlukla yüksek LS değerlerinin hâkim olduğu, dik eğimli

ve yüksek rakımlı alanlarda yoğunlaştığı belirlenmiş; böylece topoğrafyanın erozyon riskinin mekânsal dağılımında belirleyici bir rol oynadığı ortaya konmuştur. Bu durum, iklim kaynaklı değişimlere rağmen erozyon riskinin mekânsal dağılımında topoğrafyanın belirleyici rolünü vurgulamakta ve kalıcı yüksek riskli alanlarda hedefli koruma önlemlerinin gerekliliğini ortaya koymaktadır.

4.3 Atmosferik Salınımların Yağış Erozivitesi Üzerindeki Etkisi

Bu bölümde, Küçük Menderes Havzası ve çevresindeki İzmir Bölge (17220), Kuşadası (17232), Aydın (17234), Salihli (17792), Ödemiş (17822), Sultanhisar (17850), Selçuk (17854) ve Nazilli (17860) meteoroloji istasyonlarına ait uzun dönemli aylık yağış verileri kullanılmıştır. İstasyonların 1974–2023 dönemine ait 50 yıllık verilerden hareketle, yağış erozivitesini temsil etmek üzere Modified Fournier Index (MFI) hesaplanmıştır.

Telekoneksiyon etkilerini temsil etmek amacıyla Kuzey Atlantik Salınımı (NAO) ve El Niño–Güney Salınımı (ENSO) indeksleri kullanılmıştır. NAO fazları, NCAR İklim Analizi Bölümü tarafından sağlanan Hurrell istasyon bazlı DJFM NAO indeksi esas alınarak belirlenmiştir (Hurrell, 2003). ENSO fazlarının sınıflandırılmasında ise NOAA Climate Prediction Center tarafından yayımlanan Oceanic Niño Index (ONI) kullanılmıştır (NOAA, 2025).

Yağış erozivitesinin mevsimsel özellikleri, NAO ve ENSO gibi atmosferik döngülerle yakından ilişkilidir; bu döngüler yalnızca yağış miktarını değil, yağışın yıl içindeki dağılımını da etkilemektedir. Hidrolojik verilerin döngüsel yapısı dikkate alındığında, bu mevsimsel değişimlerin incelenmesinde dairesel istatistiksel yöntemler uygun bir analiz çerçevesi sunmaktadır. Bu kapsamda, havza genelindeki sekiz istasyona ait 50 yıllık veriler kullanılarak yağış erozivitesi (MFI) pik zamanlamasının, farklı iklim fazları (NAO+, NAO–, El Niño, La Niña) altındaki değişimi araştırılmıştır.

Çalışmada, yıllık döngünün modellenmesi amacıyla Von Mises dağılımına dayanan ve bu çalışma kapsamında önerilen 3 Boyutlu Dairesel Şiddet Histogramı (3D Circular Magnitude Histogram; 3D-CMH) yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede, erozivite riskinin zamanlaması ve mevsimsel yoğunlaşması, olayların şiddeti de dikkate alınarak farklı iklim fazları arasında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

4.3.1 NAO ve ENSO fazlarına göre yağış erozivitesi analizleri

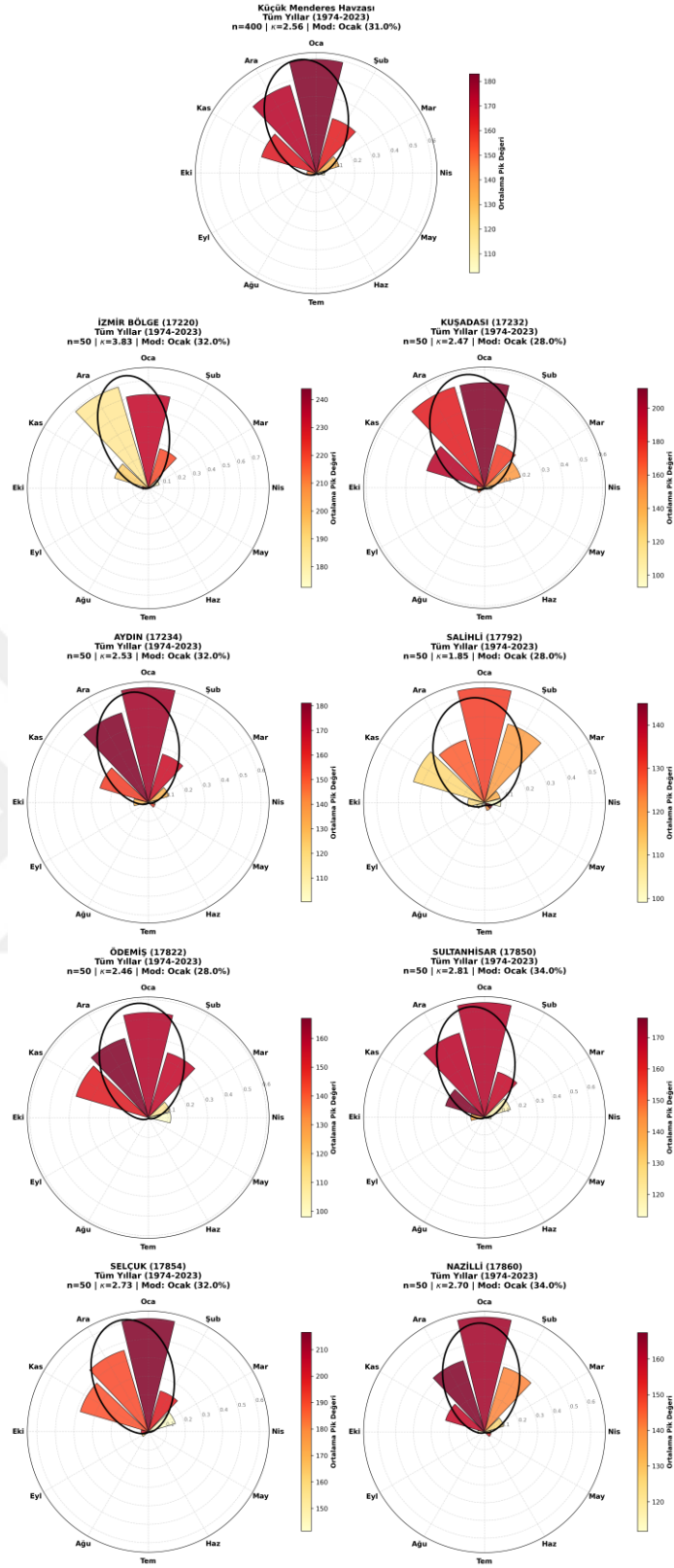
Çalışma kapsamında, Modified Fournier Index (MFI) kullanılarak temsil edilen yağış erozivitesi pik zamanlamasının, farklı iklim fazları (NAO+, NAO-, El Niño ve La Niña) altındaki mevsimsel konsantrasyon özellikleri değerlendirilmiştir. Von Mises dağılımı ile elde edilen sonuçlar, yağış erozivitesinin yıl içindeki zamanlamasının ve yoğunlaşma derecesinin atmosferik salınım fazlarına bağlı olarak belirgin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymaktadır (Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17).

Tüm yıllar birlikte ele alındığında, havza genelinde yağış erozivitesi piklerinin ağırlıklı olarak kış mevsiminde yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle Aralık–Ocak döneminde belirginleşen bu konsantrasyon, Akdeniz iklim rejiminin karakteristik yağış dağılımı ile uyumludur. Von Mises dağılımında konsantrasyon derecesini ifade eden κ parametresi, bu mevsimsel yoğunlaşmanın gücünü nicel olarak ortaya koymaktadır.

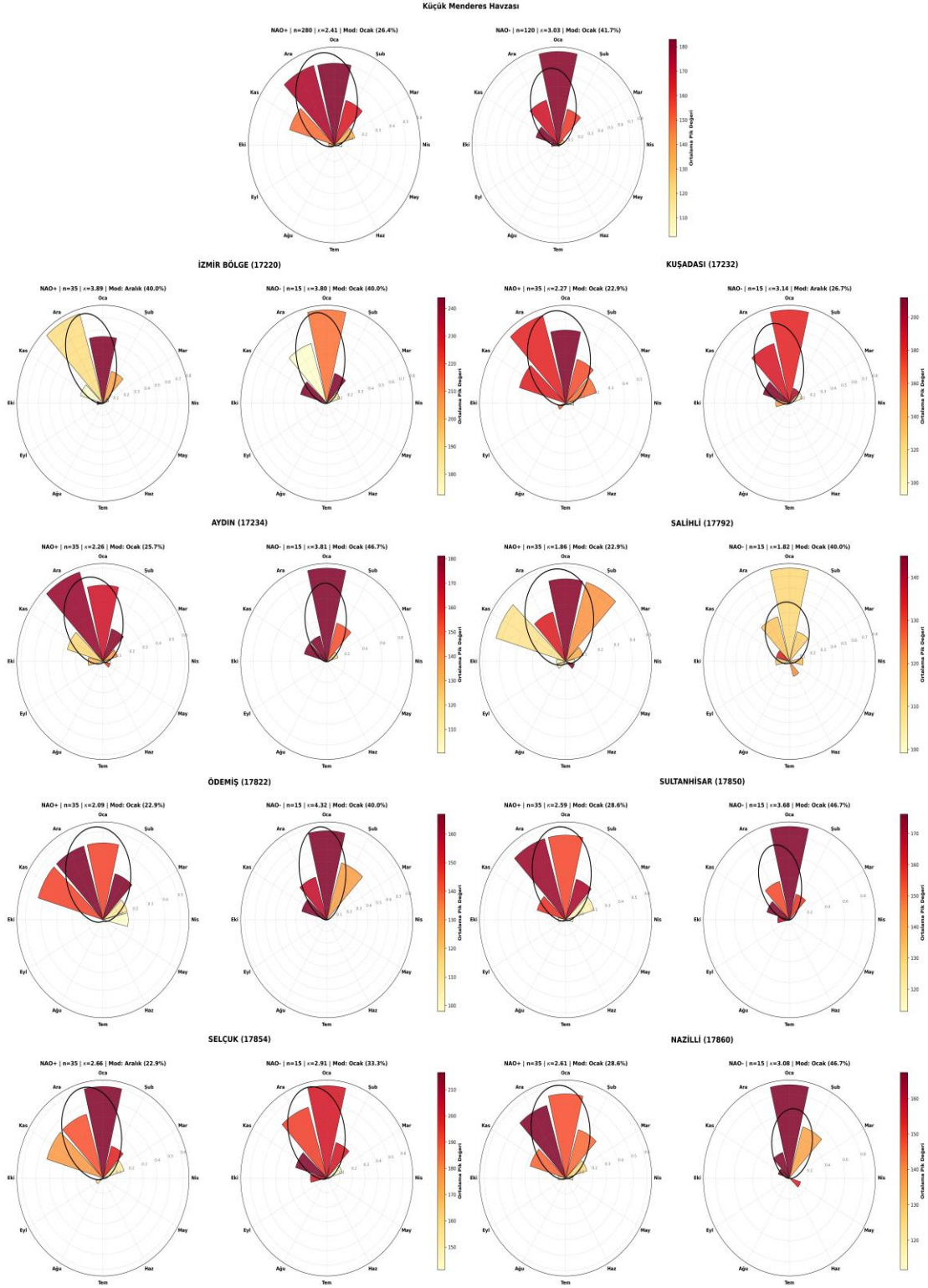
İklim fazlarına göre yapılan karşılaştırmalar, NAO- evresinde yağış erozivitesi piklerinin daha dar bir zaman aralığında yoğunlaştığını göstermektedir. Bu fazda κ değerinin yüksek olması ($\kappa \approx 3.03$), erozivite piklerinin belirli bir zaman penceresinde toplandığını ve mevsimsel konsantrasyonun güçlendiğini ortaya koymaktadır. NAO- yıllarında pik zamanlaması çoğunlukla Ocak ayına karşılık gelmiş; bazı istasyonlarda bu ayda gözlenen pik frekansının %40'ın üzerine çıktığı belirlenmiştir.

Bu bulgular, Akdeniz iklim koşullarında kış mevsimine özgü yağış erozivitesi yoğunlaşmasının, negatif NAO fazlarında daha da belirginleştiğini göstermektedir. Buna karşılık, NAO+, El Niño ve La Niña fazlarında κ değerlerinin daha düşük olduğu, dolayısıyla yağış erozivitesi piklerinin sonbahar–kış dönemine daha geniş bir zaman aralığında yayıldığı görülmektedir (Tablo 1). Bu durum, söz konusu iklim fazlarında mevsimsel yoğunlaşmanın zayıfladığını ve erozivite riskinin yıl içine daha dağınık biçimde dağıldığını göstermektedir.

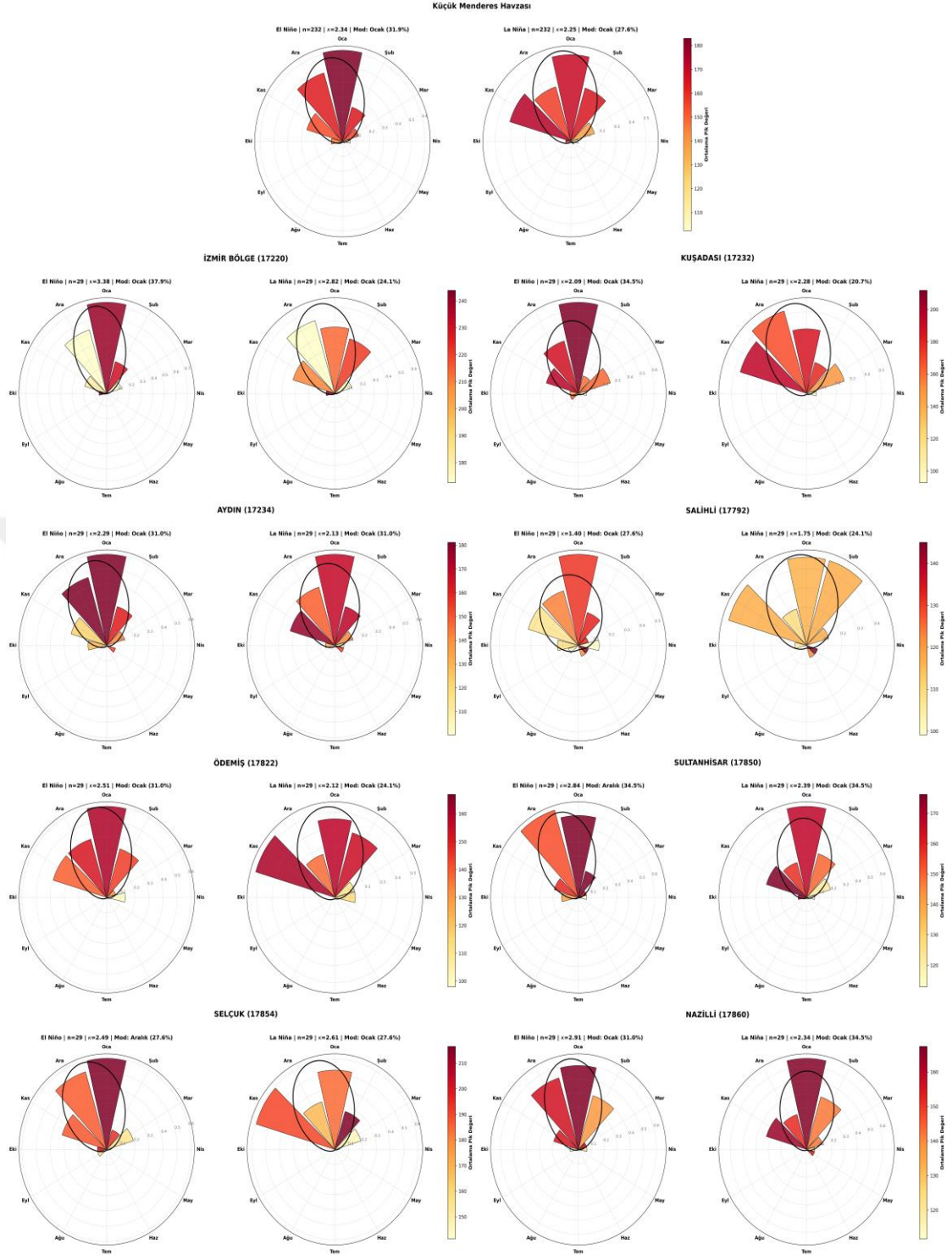
Havza genelinde ortalama pik büyüklükleri incelendiğinde, NAO(+) ve NAO(-) fazları arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir. Buna karşın ENSO fazları açısından yapılan değerlendirmeler, El Niño dönemlerinde La Niña'ya kıyasla daha yüksek ortalama pik büyüklüklerinin oluştuğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.15 : Tüm yıllar için yağış erozivitesi (MFI) pik zamanlamasının mevsimsel konsantrasyonu.



Şekil 4.16 : NAO fazlarına göre yağış erozivitesi (MFI) pik zamanlamasının mevsimsel konsantrasyonu.



Şekil 4.17 : ENSO fazlarına göre yağış erozivitesi (MFI) pik zamanlamasının mevsimsel konsantrasyonu.

Tüm yıllar için hesaplanan ortalama MFI değeri 108.7'dir. NAO– fazında MFI değeri yaklaşık %5.0 artarak 114.1 seviyesine yükselmiştir. Bu artış, yalnızca yağış erozivitesinin büyüklüğünün arttığını değil, aynı zamanda bu artışın daha dar bir zaman diliminde yoğunlaştığını göstermektedir. Buna karşılık, NAO+, El Niño ve La

Niña fazlarında MFI değerleri düşüş göstermiş; yağış şiddeti ve erozivite potansiyeli göreceli olarak zayıflamıştır. Havza genelinde gözlenen en belirgin pozitif (+%5.0) ve negatif (-%2.1) sapmaların NAO fazlarıyla ilişkili olması, Kuzey Atlantik Salınımı'nın ENSO'ya kıyasla bölgesel hidroklimatik süreçler üzerinde daha baskın ve belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır (Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6).

Genel olarak elde edilen bulgular, Küçük Menderes Havzası'nın büyük ölçekli atmosferik salınlara duyarlı bir hidroklimatik yapı sergilediğini göstermektedir. Özellikle NAO- fazı, yağış erozivitesinin hem zamansal olarak daha yoğunlaşmasına hem de ortalama MFI değerlerinin artmasına neden olarak en yüksek hidroklimatik riski oluşturmaktadır. Bu sonuçlar, yağış erozivitesine bağlı risklerin değerlendirilmesinde atmosferik salınım fazlarının dikkate alınmasının, havza ölçeğindeki hidrolojik planlama ve risk yönetimi açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.5 : İstasyon bazında MFI pik zamanlamasının Von Mises dağılımı ile elde edilen istatistikleri.

İstasyon	Tüm Yıllar n	Tüm Yıllar κ	Tüm Yıllar Mod	NAO+ n	NAO+ κ	NAO+ Mod	NAO- n	NAO- κ	NAO- Mod	El Niño n	El Niño κ	El Niño Mod	La Niña n	La Niña κ	La Niña Mod
İzmir Bölge (17220)	50	3.83	Oca (32%)	35	3.89	Ara (40%)	15	3.80	Oca (40%)	29	3.38	Oca (38%)	29	2.82	Oca (24%)
Kuşadası (17232)	50	2.47	Oca (28%)	35	2.27	Oca (23%)	15	3.14	Ara (27%)	29	2.09	Oca (34%)	29	2.28	Oca (21%)
Aydın (17234)	50	2.53	Oca (32%)	35	2.26	Oca (26%)	15	3.81	Oca (47%)	29	2.29	Oca (31%)	29	2.13	Oca (31%)
Salihli (17792)	50	1.85	Oca (28%)	35	1.86	Oca (23%)	15	1.82	Oca (40%)	29	1.40	Oca (28%)	29	1.75	Oca (24%)
Ödemiş (17822)	50	2.46	Oca (28%)	35	2.09	Oca (23%)	15	4.32	Oca (40%)	29	2.51	Oca (31%)	29	2.12	Oca (24%)
Sultanhisar (17850)	50	2.81	Oca (34%)	35	2.59	Oca (29%)	15	3.68	Oca (47%)	29	2.84	Ara (34%)	29	2.39	Oca (34%)
Selçuk (17854)	50	2.73	Oca (32%)	35	2.66	Ara (23%)	15	2.91	Oca (33%)	29	2.49	Ara (28%)	29	2.61	Oca (28%)
Nazilli (17860)	50	2.70	Oca (34%)	35	2.61	Oca (29%)	15	3.08	Oca (47%)	29	2.91	Oca (31%)	29	2.34	Oca (34%)
Havza Geneli	400	2.56	Oca (31%)	280	2.41	Oca (26%)	120	3.03	Oca (42%)	232	2.34	Oca (32%)	232	2.25	Oca (28%)

Çizelge 4.6 : İstasyon bazında ortalama MFI değerleri ve NAO–ENSO fazlarına bağlı yüzdesel sapmalar.

İstasyon	Tüm Yıllar	NAO+	NAO+ Δ%	NAO-	NAO- Δ%	El Niño	Niño Δ%	La Niña	Niña Δ%
İzmir Bölge (17220)	132.7	129.6	-2.3%	139.8	+5.4%	130.9	-1.3%	130,2	-1,9
Kuşadası (17232)	123.1	123.0	-0.1%	123.3	+0.2%	122.4	-0.6%	118,1	-4,1
Aydın (17234)	107.8	103.9	-3.6%	116.9	+8.4%	107.0	-0.8%	104,8	-2,7
Salihli (17792)	76.1	76.9	+1.0%	74.2	-2.4%	75.4	-0.8%	75,2	-1,1
Ödemiş (17822)	98.1	96.3	-1.9%	102.4	+4.4%	92.9	-5.3%	97,9	-0,2
Sultanhisar (17850)	104.4	99.3	-4.9%	116.3	+11.4%	102.5	-1.8%	104,6	0,2
Selçuk (17854)	127.8	126.6	-0.9%	130.6	+2.2%	126.0	-1.4%	124,1	-2,8
Nazilli (17860)	99.9	95.7	-4.2%	109.6	+9.8%	97.7	-2.1%	101,8	2,0
Havza Geneli	108.7	106.4	-2.1%	114.1	+5.0%	106.9	-1.7%	107,1	-1,5

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Küçük Menderes Nehir Havzası'nda yağış erozivitesinin uzun dönemli eğilimleri ve atmosferik salınımlara bağlı değişimleri ile iklim değişikliği koşulları altında toprak erozyonu dinamiklerinin bütüncül bir yaklaşımla ele alınması amaçlanmıştır. Uzun dönemli yağış verileri kullanılarak yağış erozivitesinin zaman serisi analizi yapılmış, havza ölçeğinde Yenilenmiş Evrensel Toprak Kaybı Denklemi (RUSLE) modeli ve yüksek çözünürlüklü CMIP6 tabanlı iklim projeksiyonları aracılığıyla toprak erozyonundaki olası değişimler değerlendirilmiştir.

Geleceğe yönelik senaryolar ile erozyon riskinin mekânsal ve zamansal dağılımı ortaya konulmuştur. Ayrıca, iklim projeksiyonlarının yanı sıra Kuzey Atlantik Salınımı (NAO) ve El Niño–Güney Salınımı (ENSO) gibi büyük ölçekli atmosferik salınımların havza ölçeğinde yağış erozivitesi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu analizler, bu çalışma kapsamında geliştirilen ve yağış erozivitesinin zamanlama, olasılık yoğunluğu ve büyüklük bileşenlerini birlikte ele alan dairesel istatistik temelli yöntem kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Bu doğrultuda, 1974–2023 dönemine ait 50 yıllık aylık yağış verileri kullanılarak, Küçük Menderes Nehir Havzası ve çevresindeki istasyonlarda yağış erozivitesinin zamansal değişimi Modifiye Fournier İndeksi (MFI) üzerinden değerlendirilmiştir. Zaman serisi analizleri, yağış erozivitesinin aylık ve yıllık ölçekte belirgin dalgalanmalar sergilediğini ve bu değişimin tek yönlü bir eğilimden ziyade yüksek değişkenlik karakteri taşıdığını ortaya koymuştur; bazı yıllarda yağış miktarındaki azalmaya bağlı geçici MFI düşüşleri de bu durumu desteklemektedir. Dağılım analizleri, kıyı kesiminde yer alan İzmir ve Selçuk istasyonlarının yüksek ve değişken yağış özellikleri nedeniyle MFI değerleri bakımından diğer istasyonlardan belirgin biçimde ayrıldığını göstermiştir.

Modifiye Mann–Kendall trend testi sonuçları, istasyonların büyük çoğunluğunda yağış ve MFI değerleri açısından istatistiksel olarak anlamlı ve homojen bir artış veya azalış eğilimi bulunmadığını ortaya koymuştur. Buna karşın bazı istasyonlarda belirli

dönemlerde zayıf pozitif veya negatif eğilimler gözlenmiştir. Mevsimsel ölçekli değerlendirmelerde ise, yaz aylarında artan trendlerin daha yaygın olduğu, kış aylarında ise azalan trendlerin öne çıktığı tespit edilmiştir.

Küçük Menderes Nehir Havzası'nda iklim değişikliğinin toprak erozyonu üzerindeki olası etkileri, CMIP6 tabanlı, yüksek mekânsal çözünürlüğe sahip ve ölçek küçültme işlemi uygulanmış iklim projeksiyonları ile RUSLE modelinin birlikte kullanılmasıyla değerlendirilmiştir. RUSLE modelinde yağış erozivite faktörünün (R) hesaplanmasında kullanılacak en uygun yaklaşımı belirlemek amacıyla test edilen 10 ampirik denklem arasında, en düşük yanlılık (PBIAS) değerine sahip olan Torri ve diğ. (2006) modeli öne çıkmıştır. Çalışma kapsamında yapılan değerlendirmeler, söz konusu yaklaşımın Akdeniz iklim koşullarına olan uyumu ve düşük zamansal çözünürlüklü yağış verileriyle uygulanabilirliği sayesinde, özellikle EI₃₀ hesaplamasının mümkün olmadığı durumlarda R faktörünün tahmini için güvenilir bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Geleceğe yönelik projeksiyonlarda, 13 Küresel Dolaşım Modelinin çoklu model ortalaması kullanılarak SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryoları altında yakın (2021–2040), orta (2041–2060), geç (2061–2080) ve yüzyıl sonu (2081–2100) dönemlerini kapsayan dört farklı zaman dilimi için analizler gerçekleştirilmiştir. Referans dönemde (1970–2000) R faktörü 1250.4 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yıl⁻¹, ortalama yıllık toprak kaybı 29.56 t ha⁻¹ yıl⁻¹ ve sediment verimi 6.81 t ha⁻¹ yıl⁻¹ olarak hesaplanmış; sediment iletim oranı %23 olarak belirlenmiştir.

Orta emisyon senaryosu olan SSP2-4.5 altında, yağış erozivitesi ve toprak kaybı değerlerinde yüzyıl boyunca yalnızca sınırlı dalgalanmalar gözlenmiştir. Erken ve geç dönemlerde hafif artışlar, orta dönemlerde ise nispeten düşük değerler ortaya çıkmış; bu zamansal davranış, SSP2-4.5 senaryosu altında havzanın belirgin bir doğrusal eğilimden ziyade U-şekilli bir zamansal desen sergilediğini göstermiştir. Buna karşılık, SSP5-8.5 senaryosu altında özellikle yüzyılın sonuna doğru yağış erozivitesi ve buna bağlı toprak kaybında belirgin azalmalar öngörülmüştür. Bu düşüş, yıllık yağış miktarındaki ve erozivite yağış olaylarının sıklığındaki azalma ile ilişkilendirilmiştir.

Zamansal değişimlere karşın, erozyon riskinin mekânsal dağılımının büyük ölçüde korunduğu görülmüştür. Çoğu senaryoda, “çok yüksek” erozyon risk sınıfı havza alanının yaklaşık %53–57’sini kapsarken, “yüksek” risk sınıfı %27–32 aralığında

değişmiştir. Bu mekânsal süreklilik, havzanın topoğrafik özellikleri ile yakından ilişkilidir. Doğudan batıya doğru dağlık alanlardan daha düşük eğimli ovalara geçiş gösteren havza topoğrafyasıyla uyumlu olan bu desen, kuzey ve güneydeki dağlık bölgelerde de belirgin biçimde izlenmektedir. Yüksek eğim ve uzun yamaçların hâkim olduğu bu alanlarda erozyon riski kalıcı olarak yüksek kalırken, daha düz topoğrafyaya sahip kesimler görece düşük risk seviyeleriyle öne çıkmaktadır. Bu yapı yalnızca SSP5-8.5 senaryosunun yüzyıl sonu döneminde kısmen zayıflamış ve çok yüksek risk sınıfının oranı %48.3'e gerilemiştir; bu durum, erozyon risk sınıflarındaki anlamlı değişimlerin ancak aşırı iklim koşulları altında ortaya çıktığını göstermektedir.

Elde edilen bulgular, iklim değişikliğinin toprak kaybının büyüklüğü üzerinde etkili olduğunu; ancak erozyon riskinin mekânsal dağılımının büyük ölçüde topoğrafya tarafından kontrol edildiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, geleceğe yönelik erozyon yönetim stratejilerinin yalnızca iklim projeksiyonlarına dayandırılmaması, özellikle eğimli ve erozyona duyarlı alanlarda hedefli ve uzun vadeli koruma önlemlerine öncelik verilmesi gerekmektedir. İklim değişikliği ve diğer çevresel baskılar altında gelecekteki toprak kayıplarının öngörülmesi, ekonomik ve çevresel açıdan büyük önem taşımakta olup, bu tür değerlendirmeler RUSLE modeli veya gelecekte geliştirilecek alternatif modeller aracılığıyla gerçekleştirilebilir.

Telekoneksiyon etkilerinin incelenmesinde, geleneksel frekans analizlerinin ötesine geçilerek, iki boyutlu Von Mises tabanlı dairesel gösterim üçüncü bir boyutla zenginleştirilmiş 3 Boyutlu Dairesel Şiddet Histogramı (3D Circular Magnitude Histogram; 3D-CMH) yaklaşımı önerilmiştir. Bu yaklaşım sayesinde erozivite riskinin zamanlama, olasılık yoğunluğu ve büyüklük bileşenleri tek bir analitik yapı içerisinde bütüncül biçimde incelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada elde edilen sonuçlar doğrultusunda, yağış erozivitesinin yalnızca yerel iklim koşulları ve iklim değişikliği etkileriyle değil, büyük ölçekli atmosferik salınımlarla da yakından ilişkili olduğu görülmektedir. Uzun dönemli değerlendirmeler kapsamında, 1974–2023 dönemine ait veriler dikkate alındığında, havza genelinde yağış erozivitesi piklerinin ağırlıklı olarak kış mevsiminde yoğunlaştığı belirlenmiştir. NAO fazlarına göre yapılan analizler, özellikle NAO–evrelerinde yağış erozivitesi piklerinin mevsimsel konsantrasyonunun belirgin biçimde arttığını ve bu yoğunlaşmanın kış aylarında daha da güçlendiğini

göstermektedir. Buna karşılık NAO+ evrelerinde yağış erozivitesi daha geniş bir zamansal aralığa yayılmış ve mevsimsel konsantrasyon zayıflamıştır.

ENSO fazları açısından değerlendirildiğinde, El Niño ve La Niña evrelerinde yağış erozivitesi piklerinin sonbahar–kış dönemine daha geniş bir zamansal aralıkta yayıldığı tespit edilmiştir. Bu durum, söz konusu iklim fazlarında mevsimsel yoğunlaşmanın zayıfladığını ve erozivite riskinin yıl içine daha dağınık biçimde yayıldığını göstermektedir.

Uzun dönem için, 1974–2023 dönemine ait aylık yağış verilerine dayalı olarak hesaplanan ortalama MFI değeri 108.7 iken, NAO– fazında bu değerin yaklaşık %5 arttığı görülmüştür. Bu artış, yağış erozivitesinin büyüklüğünde belirgin bir yükselişe işaret etmektedir. Ayrıca, söz konusu artışın daha dar bir zaman dilimi içerisinde yoğunlaşması, yağış erozivitesi riskinin bu fazda belirgin biçimde arttığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, NAO’nun ENSO’ya kıyasla bölgesel hidroklimatik süreçler üzerinde daha belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Genel olarak elde edilen sonuçlar, yağış erozivitesinin mevsimsel yoğunlaşmalar ve atmosferik salınımlara bağlı dalgalanmalar tarafından şekillendiğini ortaya koymaktadır. Özellikle NAO– fazı, yağış erozivitesinin artışı ve mevsimsel yoğunlaşması nedeniyle havza ölçeğinde en yüksek hidroklimatik riski oluşturmaktadır.

Bu çerçevede, erozyona duyarlı havzalarda NAO ve ENSO gibi büyük ölçekli atmosferik salınımların etkilerinin dikkate alınması, daha gerçekçi erozyon risk analizlerinin yapılması ve sürdürülebilir arazi yönetim stratejilerinin geliştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

KAYNAKLAR

- Abeyasingha, N. S., & Ray, R. L.** (2025). Rivers at risk, soil erosion in a changing climate: A comprehensive review. *Discov. Soil*, 2, 16. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00040-9>
- Ahmed, K., Sachindra, D. A., Shahid, S., Iqbal, Z., Nawaz, N., & Khan, N.** (2020). Multi-model ensemble predictions of precipitation and temperature using machine learning algorithms. *Atmos. Res.*, 236, 104806. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104806>
- Akgoz, R., Deviren Saygin, S., Erpul, G., & Tel, S.** (2022). Monitoring seasonal and phenological variability of cover management factor for wheat cropping systems under semi-arid climate conditions. *Environ. Monit. Assess.*, 194, 395. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10064-1>
- Altıkat, S., Kuş, E., Küçükerdem, H. K., & Gülbe, A.** (2018). The importance of conservation agriculture for Turkey. *Iğdır University Journal of the Institute of Science and Technology*, 8(2), 73–80. <https://doi.org/10.21597/jist.427894>
- Amundson, R., Berhe, A. A., Hopmans, J. W., Olson, C., Sztein, A. E., & Sparks, D. L.** (2015). Soil and human security in the 21st century. *Science*, 348(6235). <https://doi.org/10.1126/science.1261071>
- Angulo-Martínez, M., & Beguería, S.** (2012). Do atmospheric teleconnection patterns influence rainfall erosivity? A study of NAO, MO and WeMO in NE Spain, 1955–2006. *Journal of Hydrology*, 450–451, 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.063>
- Apaydın, H., Erpul, G., Bayramin, İ., & Gabriels, D.** (2006). Evaluation of indices for characterizing the distribution and concentration of precipitation: A case for the region of Southeastern Anatolia Project, Turkey. *Journal of Hydrology*, 328(3–4), 726–732. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.01.019>
- Arnoldus, H. M. J.** (1977). Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. *FAO Soils Bulletins* 34. Rome: FAO.
- Arnoldus, H. M. J.** (1980). An approximation to the rainfall factor in the universal soil loss equation. In M. De Boodt & D. Gabriels (Eds.), *Assessment of Erosion* (pp. 127–132). John Wiley and Sons.
- Babu, R., Dhyani, B. L., & Kumar, N.** (2004). Assessment of erodibility status and refined Iso-Erodent Map of India. *Indian J. Soil Conserv.*, 32, 171–177.

- Biasutti, M., & Seager, R.** (2015). Projected changes in US rainfall erosivity. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 2945–2961. <https://doi.org/10.5194/hess-19-2945-2015>
- Boyce, R. C.** (1975). Sediment routing with sediment delivery ratios. In *Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources*, ARS-S-40 (pp. 61–65). U.S. Department of Agriculture.
- Chappell, A., Baldock, J., & Sanderman, J.** (2016). The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes. *Nature Climate Change*, 6(2), 187–191. <https://doi.org/10.1038/nclimate2829>
- Chen, L., Guo, S. L., Yan, B. W., Liu, P., & Fang, B.** (2010). A new seasonal design flood method based on bivariate joint distribution of flood magnitude and date of occurrence. *Hydrological Sciences Journal*, 55(8), 1264–1280. <https://doi.org/10.1080/02626667.2010.520564>
- Chen, Y., Wei, T., Li, J., Xin, Y., & Ding, M.** (2024). Future changes in global rainfall erosivity: Insights from the precipitation changes. *J. Hydrol.*, 638, 131435. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131435>
- Choudhury, M. K., & Nayak, T.** (2003). Estimation of soil erosion in Sagar Lake catchment of Central India. In *Proceedings of the International Conference on Water and Environment* (pp. 387–392). Bhopal.
- Deviren Saygin, S., & Erpul, G.** (2019). Modeling aggregate size distribution of eroded sediment resulting from rain-splash and raindrop impacted flow processes. *International Journal of Sediment Research*, 34(2), 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.10.004>
- Dhakal, N., Jain, S., Gray, A., Dandy, M., & Stancioff, E.** (2015). Nonstationarity in seasonality of extreme precipitation: A nonparametric circular statistical approach and its application. *Water Resources Research*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1002/2014WR016399>
- Dingman, S.L.**, 2015. *Physical Hydrology*, 3rd ed. Waveland Press, Long Grove, Illinois.
- Duulatov, E., Chen, X., Amanambu, A. C., Ochege, F. U., Orozbaev, R., Issanova, G., & Omurakunova, G.** (2019). Projected rainfall erosivity over Central Asia based on CMIP5 climate models. *Water*, 11, 897. <https://doi.org/10.3390/w11050897>
- Eastman, J. R., & McKendry, J.** (1991). *Change and time series analysis: Explorations in geographic information systems technology*. United Nations Institute for Training and Research (UNITAR).
- Eekhout, J. P. C., & de Vente, J.** (2022). Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation. *Earth Sci. Rev.*, 226, 103921. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.103921>
- Efthimiou, N.** (2018). Evaluating the performance of different empirical rainfall erosivity (R) factor formulas using sediment yield measurements. *Catena*, 169, 195–208. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.05.037>

- Erpul, G., İnce, K., Demirhan, A., Küçümen, A., Akdağ, M. A., Demirtaş, İ., Sarıhan, B., Çetin, E., & Şahin, S. (2020). *Su erozyonu il istatistikleri – toprak erozyonu kontrol stratejileri (Sürdürülebilir arazi/toprak yönetimi uygulama ve yaklaşımları)*. Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Erpul, G., Şahin, S., İnce, K., Küçümen, A., Akdağ, M. A., Demirtaş, İ., & Çetin, E. (2018). *Türkiye su erozyonu atlası*. Çölleşme ve Erozyonla Mücadele Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Ferrari, R., Pasqui, M., Bottai, L., Esposito, S., & Di Giuseppe, E. (2005). Assessment of soil erosion estimate based on a high temporal resolution rainfall dataset. In *Proceedings of the Seventh European Conference on Applications of Meteorology (ECAM)*. Utrecht.
- Fick, S. E., & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 37(12), 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Forkel, M., Carvalhais, N., Verbesselt, J., Mahecha, M. D., Neigh, C. S. R., & Reichstein, M. (2013). Trend change detection in NDVI time series: Effects of inter-annual variability and methodology. *Remote Sens.*, 5, 2113–2144. <https://doi.org/10.3390/rs5052113>
- Getachew, B., Manjunatha, B. R., & Bhat, G. H. (2021). Assessing current and projected soil loss under changing land use and climate using RUSLE with remote sensing and GIS in the Lake Tana Basin, Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.*, 24, 907–918. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.10.001>
- Gezici, K., Şengül, S., & Kesgin, E. (2025). Assessment of soil erosion risk in the mountainous region of northeastern Türkiye based on the RUSLE model and CMIP6 climate projections. *Environ. Earth Sci.*, 84, 167. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12184-6>
- Ghavami, M. S., Ayoubi, S., Khaleghpanah, N., Mosaddeghi, M. R., & Gohari, A. (2024). Soil loss estimation using RUSLE model: Comparison of conventional and digital soil data at watershed scale in central Iran. *Soil Tillage Res.*, 244, 106238. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106238>
- Ghosal, K., & Das Bhattacharya, S. (2020). A review of RUSLE model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 48(5), 689–707. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01097-0>
- Ghosh, A., Rakshit, S., Tikle, S., Das, S., Chatterjee, U., Pande, C. B., Alataway, A., Al-Othman, A. A., Dewidar, A. Z., & Mattar, M. A. (2022). Integration of GIS and remote sensing with RUSLE model for estimation of soil erosion. *Land*, 12(1), 116. <https://doi.org/10.3390/land12010116>
- Goossens, C., & Berger, A. (1986). Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. *Annales Geophysicae*, 4(4), 385–399.

- Gökçe Gündüzoğlu, H. A., & Gündüzoğlu, G.** (2025). Assessment of potential erosion risk in Küçük Menderes basin according to land use/land cover classes. *Artvin Coruh University Journal of Forestry Faculty*, 26(1), 90–103. <https://doi.org/10.17474/artvinofd.1540609>
- Grillakis, M. G., Polykretis, C., & Alexakis, D. D.** (2020). Past and projected climate change impacts on rainfall erosivity: Advancing our knowledge for the eastern Mediterranean island of Crete. *Catena*, 193, 104625. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104625>
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O.** (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), 135–143.
- Güney, Y.** (2025). Muğla'da yağış erozivitesinin mekânsal ve zamansal dağılışı ile eğilimleri. *Türk Coğrafya Dergisi*, (87), 39–52. <https://doi.org/10.17211/tcd.1384961>
- Hamed, K. H., & Rao, A. R.** (1998). A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data. *J. Hydrol.*, 204, 182–196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Hateffard, F., Mohammed, S., Alsafadi, K., Enaruvbe, G. O., Heidari, A., Abdo, H. G., & Rodrigo-Comino, J.** (2021). CMIP5 climate projections and RUSLE-based soil erosion assessment in the central part of Iran. *Sci. Rep.*, 11, 7273. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86618-z>
- Hurni, H.** (1985). Erosion—productivity—conservation systems in Ethiopia. In *Proceedings of the 4th International Conference on Soil Conservation* (pp. 654–674). Maracay.
- Hurrell, J. W.** (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: Regional temperatures and precipitation. *Science*, 269(5224), 676–679. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/decadal-trends-north-atlantic-oscillation/docview/213573102/se-2>
- Hurrell, J. W.** (2003). NAO station-based index. *Climate Analysis Section, NCAR*. Erişim tarihi: 6 Aralık 2025, <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/hurrell-north-atlantic-oscillation-nao-index-station-based>
- IPCC.** (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- İpek, A. F., & Kahya, E.** (2026). Integrating spatio-probabilistic mapping and remote sensing for comprehensive drought risk assessment. *Modeling Earth Systems and Environment*, 12, 43. <https://doi.org/10.1007/s40808-025-02696-2>
- Kadioğlu, M., Tulunay, Y., & Borhan, Y.** (1999). Variability of Turkish precipitation compared to El Niño events. *Geophysical Research Letters*, 26(11), 1597–1600. <https://doi.org/10.1029/1999GL900305>

- Kahya, E., Mehr, A. D., Şen, O., Akçakaya, A., & Özger, M.** (2016). A comparative study on the current and future design storms over Rize province, Turkey. In *12th International Congress on Advances in Civil Engineering (ACE 2016)*. Istanbul.
- Karabörk, M. Ç., & Kahya, E.** (2003). The teleconnections between the extreme phases of the Southern Oscillation and precipitation patterns over Turkey. *International Journal of Climatology*, 23(13), 1607–1625. <https://doi.org/10.1002/joc.958>
- Karabörk, M. Ç., Kahya, E., & Karaca, M.** (2005). The influences of the Southern and North Atlantic Oscillations on climatic surface variables in Turkey. *Hydrological Processes*, 19(6), 1185–1211. <https://doi.org/10.1002/hyp.5560>
- Karabörk, M. Ç., Kahya, E., & Kömüßçü, A. Ü.** (2007). Analysis of Turkish precipitation data: Homogeneity and the Southern Oscillation forcings on frequency distributions. *Hydrological Processes*, 21(23), 3203–3210. <https://doi.org/10.1002/hyp.6524>
- Karaca, M., Tayanç, M., & Toros, H.** (1995). Effects of urbanization on climate of İstanbul and Ankara. *Atmospheric Environment*, 29(23), 3411–3421. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00085-D](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00085-D)
- Kendall, M. G.** (1975). *Rank Correlation Methods*. Charles Griffin.
- Kilic, O. M., & Gunal, H.** (2021). Spatial-temporal changes in rainfall erosivity in Turkey using CMIP5 global climate change scenario. *Arab. J. Geosci.*, 14, 1079. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07184-2>
- Koralay, N., & Kara, Ö.** (2025). Risk assessment of soil erosion with RUSLE using geographic information system and organic carbon and total nitrogen loadings of suspended sediment in Sogutlu Stream Watershed of Trabzon, Turkey. *Environ. Earth Sci.*, 84, 258. <https://doi.org/10.1007/s12665-025-12271-8>
- Lal, R.** (2001). Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), 519–539. <https://doi.org/10.1002/ldr.472>
- Legates, D. R., & McCabe, G. J.** (1999). Evaluating the use of 'goodness-of-fit' measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1), 233–241.
- Liu, P., Guo, B., Zhang, R., & Wang, L.** (2024). Spatial–temporal evolution pattern of soil erosion and its dominant factors on the Loess Plateau from 2000 to 2020. *Land*, 13, 1944. <https://doi.org/10.3390/land13111944>
- Lopes, J. W. B., & de Araújo, J. C.** (2019). Simplified method for the assessment of siltation in semiarid reservoirs using satellite imagery. *Water*, 11(5), 998. <https://doi.org/10.3390/w11050998>
- Mann, H. B.** (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13(3), 245–259.
- Mardia, K. V., & Jupp, P. E.** (1999). *Directional statistics*. Wiley.

- Mardia, K. V., Hughes, G., Taylor, C. C., & Singh, H.** (2008). A multivariate von Mises distribution with applications to bioinformatics. *Canadian Journal of Statistics*, 36(1), 99–109.
- McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., & Glantz, M. H.** (2006). ENSO as an integrating concept in earth science. *Science*, 314(5806), 1740–1745.
- Menghis, T. B., Zdruli, P., & Dobos, E.** (2025). A GIS-based approach to soil erosion risk assessment using RUSLE: The case of the Mai Nefhi watershed, Barka River Basin, Eritrea. *Earth*, 6, 58. <https://doi.org/10.3390/earth6020058>
- Mohammadi, A. A., Akgoz, R., Deviren Saygin, S., & Erpul, G.** (2025). Validation and comparison of event-based sediment yield estimations using MUSLE and RUSLE/SDR models: the case of Çarşamba Suyu sub-basin, southwest central Anatolia, Türkiye. *Nat. Hazards*, 121, 13501–13542. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07328-7>
- Moore, I. D., & Burch, G. J.** (1986a). Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50, 1294–1298.
- Moore, I. D., & Burch, G. J.** (1986b). Modeling erosion and deposition: topographic effects. *Trans. ASAE*, 29, 1624–1630.
- 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.
- NASA.** (2024). Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples (AppEEARS). Erişim tarihi: 2024, <https://appears.earthdatacloud.nasa.gov/>
- NOAA Climate Prediction Center.** (2025). Oceanic Niño Index (ONI) v5. *National Oceanic and Atmospheric Administration*. Erişim tarihi: 6 Aralık 2025, https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Oduro-Afriyie, K.** (1996). *Rainfall erosivity map for Ghana*. *Geoderma*, 74(1–2), 161–166.
- Oğuz, İ.** (2019). Rainfall erosivity in north-central Anatolia in Turkey. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 2719–2731. https://doi.org/10.15666/aeer/1702_27192731
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M.** (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 9, 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Ouillon, S.** (2018). Why and how do we study sediment transport? Focus on coastal zones and ongoing methods [Editorial]. *Water*, 10, 390. <https://doi.org/10.3390/w10040390>

- Özşahin, E.** (2023). Climate change effect on soil erosion using different erosion models: A case study in the Naip Dam basin, Türkiye. *Comput. Electron. Agric.*, 207, 107711. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.107711>
- Panagos, P., Ballabio, C., Himics, M., Scarpa, S., Matthews, F., Bogonos, M., Poesen, J., & Borrelli, P.** (2021). Projections of soil loss by water erosion in Europe by 2050. *Environ. Sci. Policy*, 124, 380–392. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.07.012>
- Panagos, P., Borrelli, P., Matthews, F., Liakos, L., Bezak, N., Diodato, N., et al.** (2022). Global rainfall erosivity projections for 2050 and 2070. *Journal of Hydrology*, 610, 127865. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127865>
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K. J., Yang, J. E., Ni, J., Miao, C., Chattopadhyay, N., Sadeghi, S. H., Hazbavi, Z., Zabihi, M., Larionov, G. A., Krasnov, S. F., Gorobets, A. V., Levi, Y., Erpul, G., Birkel, C., . . . Ballabio, C.** (2017). Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Sci. Rep.*, 7, 4175. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>
- Patriche, C. V.** (2023). Applying RUSLE for soil erosion estimation in Romania under current and future climate scenarios. *Geoderma Reg.*, 34, e00687. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00687>
- Pınar, M. Ö., Şahin, S., Madenoğlu, S., & Erpul, G.** (2020). Derinöz Baraj Havzasında şiddetli erozyon alanlarının belirlenmesi ve rezervuar sediment yükünün hesaplanması. *Su Kaynakları*, 5(2), 24–33.
- Renard, K. G., & Freimund, J. R.** (1994). Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. *J. Hydrol.*, 157, 287–306.
- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., McCool, D. K., & Yoder, D. C.** (1997). *Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. Agriculture Handbook No. 703. USDA.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W.** (1974). Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (pp. 309–317). NASA.
- Ruxton, G. D.** (2017). Testing for departure from uniformity and estimating mean direction for circular data. *Biology Letters*, 13(1), 20160756.
- Sakhraoui, F., & Hasbaia, M.** (2023). Evaluation of the sensitivity of the RUSLE erosion model to rainfall erosivity: A case study of the Ksob watershed in central Algeria. *Water Supply*, 23, 3262–3284. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.182>
- Schwertmann, U., Vogl, W., & Kainz, M.** (1990). *Soil Erosion by Water*. Eugen Ulmer.

- Stefanidis, S., & Stathis, D.** (2018). Effect of climate change on soil erosion in a mountainous Mediterranean catchment (Central Pindus, Greece). *Water*, 10, 1469. <https://doi.org/10.3390/w10101469>
- SYGM.** (2016). *Küçük Menderes Havzası iklim değişikliğinin su kaynakları üzerine etkisi projesi: Proje nihai raporu, Ek 8*. Mülga T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.
- SYGM.** (2018). *Küçük Menderes Havzası kuraklık yönetim planı*. Mülga T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı Su Yönetimi Genel Müdürlüğü Yayınları.
- Şen, O., & Kahya, E.** (2021). Impacts of climate change on intensity–duration–frequency curves in the rainiest city (Rize) of Turkey. *Theor. Appl. Climatol.*, 144, 1017–1030. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03592-2>
- Tavakoli, M., & De Smedt, F.** (2012). Impact of climate change on streamflow and soil moisture in the Vermilion Basin, Illinois. *J. Hydrol. Eng.*, 17, 1059–1070.
- Tayanç, M., İm, U., Doğruel, M., & Karaca, M.** (2009). Climate change in Turkey for the last half century. *Clim. Change*, 94, 483–502. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9511-0>
- Teng, H., Liang, Z., Chen, S., Liu, Y., Viscarra Rossel, R. A., Chappell, A., Yu, W., & Shi, Z.** (2018). Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models. *Sci. Total Environ.*, 635, 673–686. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.146>
- Torri, D., Borselli, L., Guzzetti, F., Calzolari, M. C., Bazzoffi, P., Ungaro, F., Bartolini, D., & Salvati, L.** (2006). Italy. In J. Boardman & J. Poesen (Eds.), *Soil Erosion in Europe* (pp. 245–261). John Wiley & Sons.
- Torri, D., Poesen, J., & Borselli, L.** (1997). Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset. *Catena*, 31, 1–22. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(97\)00036-2](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(97)00036-2)
- Torri, D., Poesen, J., & Borselli, L.** (2002). Corrigendum to "Predictability and uncertainty of the soil erodibility factor using a global dataset" [Catena 31 (1997) 1–22]. *Catena*, 46, 309–310. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(01\)00175-8](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00175-8)
- Trenberth, K. E.** (1997). The definition of El Niño. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2771–2777.
- Tuo, D., Lu, Q., Wu, B., Li, Q., Yao, B., Cheng, L., & Zhu, J.** (2023). Effects of wind–water erosion and topographic factor on soil properties in the Loess Hilly Region of China. *Plants*, 12, 2568. <https://doi.org/10.3390/plants12132568>
- Türkeş, M., & Erhat, E.** (2003). Precipitation changes and variability in Turkey linked to the North Atlantic Oscillation during the period 1930–2000. *International Journal of Climatology*, 23(14), 1771–1796. <https://doi.org/10.1002/joc.962>

- Ugese, A. A., Ajiboye, J. O., Ibrahim, E. S., Gajere, E. N., Itse, A., & Shaba, H. A. (2022). Soil loss estimation using remote sensing and RUSLE model in Koromi-Federe catchment area of Jos-East LGA, Plateau State, Nigeria. *Geomatics*, 2, 499–517. <https://doi.org/10.3390/geomatics2040027>
- Van der Knijff, J., Jones, R., & Montanarella, L. (1999). *Soil Erosion Risk Assessment in Italy*. European Commission.
- Vazifekkhah, S., & Kahya, E. (2018). Hydrological drought associations with extreme phases of the North Atlantic and Arctic Oscillations over Turkey and northern Iran. *International Journal of Climatology*, 38(12), 4459–4475. <https://doi.org/10.1002/joc.5680>
- Vicuna, S., & Dracup, J. A. (2007). The evolution of climate change impact studies on hydrology and water resources in California. *Clim. Change*, 82, 327–350.
- Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., . . . SciPy 1.0 Contributors. (2020). SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python. *Nat. Methods*, 17, 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
- Walling, D. E., & Webb, B. W. (1996). Erosion and sediment yield: A global overview. *IAHS Publ.*, 236, 3–19.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1957). Factors affecting sheet and rill erosion. *Transactions of the American Geophysical Union*, 38(6), 889–896.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Prediction rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Agriculture Handbook 537. USDA.
- Woznicki, S. A., & Nejadhashemi, A. P. (2013). Spatial and temporal variabilities of sediment delivery ratio. *Water Resources Management*, 27, 2483–2499. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0298-z>
- Wuepper, D., Borrelli, P., & Finger, R. (2020). Countries and the global rate of soil erosion. *Nature Sustainability*, 3(1), 51–55. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0438-4>
- Yagbasan, O. (2016). Impacts of climate change on groundwater recharge in Küçük Menderes River Basin in Western Turkey. *Geodinamica Acta*, 28(3), 209–222. <https://doi.org/10.1080/09853111.2015.1121802>
- Yılmaz, M., Alemdar, K. D., & Tosunoğlu, F. (2025). Evaluation of NEX-GDDP-CMIP6 to simulate precipitation using multi-criteria decision-making analysis over Türkiye. *Theor. Appl. Climatol.*, 156, 578. <https://doi.org/10.1007/s00704-025-05805-4>



ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Ahmet Faruk İpek

ÖĞRENİM DURUMU:

- Lisans** : 2020, Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü (İngilizce)
- Lisans** : 2020, Anadolu Üniversitesi İktisat Fakültesi Uluslararası İlişkiler Bölümü
- Yüksek Lisans** : 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Hidrolik ve Su Kaynakları Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Öğretim Görevlisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Araştırma Dekanlığı Büyük Veri Ofisi (2023-Devam ediyor)
- ATİ-BU Ortak Girişim. Tokat-Niksar Belediyesi Su Temini ve Atıksu Toplama Sistemi İnşaatı (AB Destekli Proje) (2021-2022).

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Makaleler

- **İpek A. F., & Kahya, E.** (2026). Spatiotemporal prioritization of soil erosion risk using the RUSLE model and CMIP6 projections under future climate scenarios in a Mediterranean watershed. *Frontiers in Environmental Science*, 14, 1760569. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2026.1760569>
- **İpek, A. F., & Kahya, E.** Effects of NAO and ENSO phases on the seasonality of rainfall erosivity: A circular statistical evaluation based on the Modified Fournier Index. *Theoretical and Applied Climatology* (in submission).

Bildiriler

- **İpek A. F., Kahya E.** (2025). Spatio-Temporal Analysis of Long-Term Rainfall Erosivity Trends and Climate Impacts on Erosion Potential. 4th *International Graduate Research Symposium (IGRS 2025)*, May 12–14, 2025.

Projeler

- İklim Değişikliği Senaryoları Altında Su Erozyonu Risklerinin RUSLE Modeli İle Tahmin Edilmesi, 2024. İstanbul Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) Proje No: MDK-2024-46198.

