



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 13.03.2025
Kabul Tarihi : 07.05.2025

Received Date : 13.03.2025
Accepted Date : 07.05.2025

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİSİ ALTINDA KIYI BÖLGELERİNDE AYLIK YAĞIŞ REJİMİ DEĞİŞİMİ VE GELECEK YAĞIŞ-AKIŞ TEPKİSİNİN ARAŞTIRILMASI: RİZE VE ANTALYA ÇALIŞMASI

INVESTIGATION OF MONTHLY PRECIPITATION REGIME CHANGE AND FUTURE RAINFALL-RUNOFF RESPONSE IN COASTAL REGIONS UNDER THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE: A STUDY OF RIZE AND ANTALYA

Hasan Törehan BABACAN^{1*} (ORCID: 0000-0001-9570-1966)

¹ Amasya Üniversitesi, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Amasya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hasan Törehan BABACAN, hasan.babacan@amasya.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, Rize ve Antalya illerindeki aylık yağış rejimi değişimlerini ve gelecekteki yağış-akış tepkisini iklim değişikliği etkisi altında incelemektedir. Tarihsel yağış verileri ile CMIP5 kapsamında RCP8.5 emisyon senaryosu kullanılarak gelecek projeksiyonları değerlendirilmiştir. Çalışmada, Markov Zinciri yöntemiyle yağış rejimi geçiş matrisleri oluşturulmuş ve Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS), Karar Ağaçları Yöntemi (CART) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) modelleri kullanılarak akış tahminleri yapılmıştır. Antalya'da tarihsel dönemde Ocak ayında ortalama 148 mm yağış gözlenirken, GFDL projeksiyonuna göre bu değer 120 mm'ye düşmesi, HadGEM projeksiyonuna göre ise 160 mm'ye çıkması beklenmektedir. Rize'de tarihsel yıllık ortalama yağış 2300 mm olup, gelecek dönemde GFDL modeline göre %5 azalış, HadGEM modeline göre ise %3 artış tahmin edilmiştir. Akış tahminlerinde, Antalya için en başarılı model MARS ($R=0.74$, $RMSE=36.79$), Rize için ise CART ($R=0.84$, $RMSE=1.04$) olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, iklim değişikliğiyle birlikte her iki şehirde de yağış rejimi geçişlerinin keskinleşeceğini, bu durumun Antalya'da tarımsal faaliyetleri, Rize'de ise heyelan ve taşkın risklerini artıracaklarını göstermektedir. Çalışma, su yönetimi ve afet planlaması açısından kritik bulgular sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İklim değişikliği, hidrometeorolojik veri, yağış rejimi değişimi, CMIP5

ABSTRACT

This study examines changes in monthly precipitation regimes and future precipitation-runoff responses in Rize and Antalya under the impact of climate change. Historical precipitation data from 1970 to 2022 and future projections based on the RCP8.5 emission scenario of CMIP5 were analyzed. Markov Chain transition matrices were created to evaluate precipitation regime shifts, while Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS), Classification and Regression Tree (CART), and Artificial Neural Networks (YSA) models were used for streamflow predictions. In Antalya, the historical average precipitation in January was 148 mm, while projections indicate a decrease to 120 mm according to the GFDL model and an increase to 160 mm according to the HadGEM model. In Rize, the historical annual average precipitation is 2300 mm, with a projected 5% decrease in the GFDL model and a 3% increase in the HadGEM model. For streamflow prediction, MARS performed best in Antalya ($R=0.74$, $RMSE=36.79$), while CART was most accurate in Rize ($R=0.84$, $RMSE=1.04$). The results indicate that climate change will lead to more abrupt precipitation regime shifts, increasing agricultural risks in Antalya and landslide and flood risks in Rize. This study provides crucial insights for water management and disaster planning in coastal regions.

Keywords: Climate change, hydro-meteorological data, change of rainfall regime, CMIP5

ToCite: BABACAN, H. T. (2025). İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİSİ ALTINDA KIYI BÖLGELERİNDE AYLIK YAĞIŞ REJİMİ DEĞİŞİMİ VE GELECEK YAĞIŞ-AKIŞ TEPKİSİNİN ARAŞTIRILMASI: RİZE VE ANTALYA ÇALIŞMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 1020-1035.

GİRİŞ

Küresel ısınma ve iklim değişikliği son yıllarda olumsuz etkileri daha şiddetli hissedilen ve global ölçekte pek çok felaketin yaşanmasına yol açan önemli araştırma konularıdır. Bu nedenle iklim değişikliği dünyada çok fazla bölgede ekosistemi doğrudan etkileyen önemli bir çevre sorunu olarak gösterilmektedir (Grimm vd., 2013). İnsan faaliyetleri nedeniyle atmosferde artan sera gazı konsantrasyonunun önemli bir etkeni olduğu iklim değişikliği, sıcaklık ve yağış paternlerinde önemli değişikliklere yol açmaktadır (Polson vd., 2016). Değişen yağış ve sıcaklık paternleri su kaynakları, tarımsal faaliyetler, doğal çevredeki biyolojik çeşitlilik gibi kritik konuları etkileyerek, çevresel ve ekonomik sorunlara yol açmaktadır (Etukudoh vd., 2024). Bu sorunların etkileri sosyal sistemlerdeki problemleri beraberinde getirmektedir. Böylece dünyada iklim değişikliğine bağlı gelişen çevresel sorunlar, göç hareketleri, çarpık şehirleşme ve azalan ekonomik faaliyetler gibi giderek kritikleşen sonuçlar oluşturmaktadır (Piguet vd., 2011).

İklim değişikliği pek çok disiplin için önemli araştırma soruları barındırmaktadır. Hidroloji alanında iklim değişikliği araştırmaları, hidrometeorolojik parametrelerdeki zamansal ve mekânsal değişimlerin etkilerinin modellenmesinde yoğunlaşmaktadır (Rind vd., 1992; Mendoza vd., 2016; Dhamodaran ve Lakshmi, 2020). Bu araştırmalarda gözlenmiş hidrometeorolojik veriler ve CMIP verileri gibi çeşitli parametreler kullanılarak geliştirilen projeksiyon verileri kullanılmaktadır (Li vd., 2022). İklim değişikliğinin dünyada pek çok bölgede yağış rejimini etkilediği, buna bağlı olarak bazı bölgelerde kurak zamanların arttığı, bazı bölgelerde ise ani şiddetli yağışların taşkınlarla neden olduğu geçmiş araştırmalar ile ortaya konulmuştur (Lu vd., 2025; Sayat vd., 2025; Tam vd., 2025). İklim değişikliğinin hidrolojik proseslere etkisini inceleyen bu araştırmalarda çoğunlukla sıcaklık ve yağış parametreleri esas alınmaktadır (Bhuyan vd., 2018; Kundu vd., 2017; Ali vd., 2025). Sıcaklık ve yağışta yaşanan değişimler doğrudan veya dolaylı olarak pek çok parametre üzerinde istatistiksel olarak anlamlı değişikliklere neden olmaktadır (Lin vd., 2025). Yağış rejimindeki değişiklikler akarsu akış rejimlerini değiştirmekte ve bazı bölgelerde yağışlara bağlı gelişen pik akışların gözlenme sıklığını, bazı bölgelerde ise düşük akışların gözlenme sıklığını arttırmakta (Babacan ve Yüksek, 2024), kısa süreli şiddetli yağışlar infiltrasyonu düşürerek su kaynaklarını olumsuz etkilemekte (Koutný vd., 2014), kentleşmiş alanlarda kısa süreli şiddetli yağışlar şehir taşkınlarına yol açmakta (Cheng vd., 2020), kurak dönemlerin ardından gelen yoğun yağışlar erozyon riskini arttırmakta (Zhang vd., 2023; Piacentini vd., 2018), özellikle taşkın zamanı taşınan yoğun sediment su kalitesini olumsuz etkilemekte (Zhang vd., 2022) ve düşük yağış zamanlarında artan su sıcaklığına bağlı olarak suda çözünmüş oksijen miktarı düşüşü sebebiyle sucul yaşam etkilenmektedir (Danladi Bello vd., 2017). Yağışın hidrolojik proseslerde dikkatle incelenmesi gereken bir parametre olduğu geçmiş çalışma bulgularıyla literatürde desteklenmiştir. Ayrıca sıcaklık ortalamalarında yaşanan pozitif anomaliler buharlaşma miktarını arttırmakta ve buna bağlı olarak bir havzadaki su bütçesi etkilenmektedir. Sıcaklık artışı buharlaşmayı arttırarak toprak nem miktarını azaltmakta ve bu durum havzalarda su stresini artırıcı etki yapmaktadır (Dang vd., 2022). Ayrıca sıcaklıktaki artışlar zararlı böcek ve otların kontrolsüz artmasına ve tarımsal faaliyetlerin zarar görmesine neden olmaktadır (Skenđzić vd., 2021). Bu durum göz önüne alındığında bir havzada su yönetimi konularında incelenmesi gereken diğer önemli parametrenin sıcaklık olduğu anlaşılmaktadır.

Doğu Karadeniz Havzası'nda (DKH) bulunan Rize ili ve Antalya Havzası'nda (ANH) bulunan Antalya ili Türkiye'nin en fazla yıllık toplam yağış ortalamasına sahip illeridir. Rize ve Antalya illerinin topografyası şehir taşkınlarının gerçekleşme riskini arttıracak benzer topografik zorluklara sahiptir (Leventeli, 2011; Reis, 2008). Rize ve Antalya'da yüksek eğimli bölgeler ve akarsu yataklarındaki yerleşim bölgeleri taşkından kaynaklı zararların artmasına neden olacaktır (Konrad vd., 2005). Bu durum iki şehirde de yağış rejimi değişiminin bilinmesi hususunun önemini ortaya koymaktadır. Yağış rejimindeki değişiklik, taşkın oluşum süreçlerini incelerken dikkate alınması gereken önemli bir konudur (Bola vd., 2022). Ayrıca aylık ve mevsimlik yağış rejiminin incelenmesi hem taşkın riski açısından bir indikatör olarak kullanılabilecek hem de tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliği açısından kullanılabilecek değerli bulguları içermektedir. Yağış rejimine bağlı akış değerlerinin gelecekteki durumunun belirlenmesi, sulama sistemleri, erozyon önleme faaliyetleri, sürdürülebilir su yönetim planlamaları gibi temel konularda da bölgelere katkı sağlayacaktır.

Çalışma Türkiye'nin en çok yağış alan kıyı bölgeleri Antalya ve Rize'de iklim değişikliğinin yağış rejimi ve akış dinamiklerine etkisini ayrıntılı biçimde ortaya koymayı amaçlamaktadır. Markov Zinciri (MZ) yöntemi kullanılarak yağış rejimi geçişleri ayrıntılı olarak incelenmiş, Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS), Karar Ağaçları Yöntemi (CART) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi yapay zeka ve sezgisel regresyon tabanlı yöntemler kullanılarak akış tahmin modelleri geliştirilmiştir. Farklı iklim projeksiyonlarının (GFDL-ESM2M ve HadGEM2-ES), en çok yağış alan farklı kıyı bölgelerindeki mekansal ve zamansal değişimleri değerlendirilerek bu projeksiyon modellerine karşı bölgesel akış tepkileri incelenmiştir. Böylece iklim değişikliğinin bölgesel hidrolojik riskler

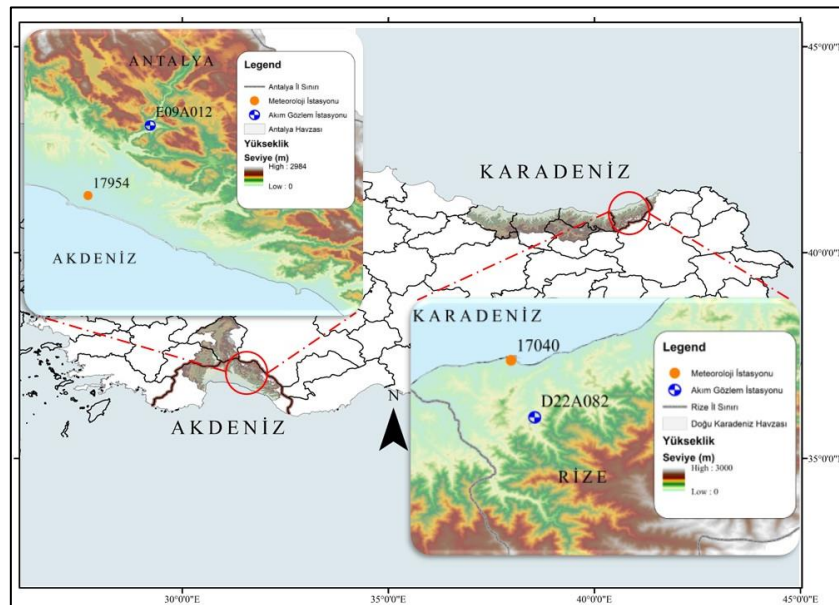
üzerindeki etkisini, gelecek akış modelleri üzerinden daha net bir şekilde inceleme imkanı sağlanmıştır. Çalışma bulguları özellikle kıyı bölgelerinde su yönetim stratejileri ve tarımsal sürdürülebilirlik açısından kritik bilgiler barındırması ve metodolojik olarak bölgelerin kapsamlı değerlendirmesini sağlamış olması nedeniyle literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

MATERYAL VE METOT

Çalışma Bölgeleri: Antalya ve Rize

Çalışma kapsamında DKH sınırları içerisinde bulunan Rize ve ANH sınırları içerisinde bulunan Antalya illeri incelenmiştir. Rize ve Antalya illeri farklı iklim özellikleri gösteren illerdir. Antalya Akdeniz tipi iklim özellikleri göstermektedir. Yazları kurak ve düşük yağış ortalamasına, kışları ise yüksek yağış ortalamasına sahiptir. Antalya’da yaz aylarında sıcaklık ortalaması 25-35°C, kış aylarında 10°C’nin üzerinde geçmektedir. Antalya ilinin kuzey kesimlerinde bulunan Toros dağlarının varlığı, bölgede orografik yağışların artmasını ve bölgedeki akış paternlerinin yağışa toleransının yüksek olmasını sağlar (Atalay vd., 2014). Yüzeysel akışın yağışa karşı toleransının yüksek olması, şiddetli yağışların taşkın oluşturma riskini arttırmaktadır. Ayrıca Antalya bölgesi değişken ve kısmen yüksek eğimli bir topografyaya sahip olduğundan, yağışların akışa geçme süresi kısalmakta ve taşkın riskinin arttığı söylenebilmektedir (Demirtaş, 2016). 2023 yılı Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre Antalya ili 3.251.403 dekar tarım alanı ile Türkiye’nin toplam tarım alanının %1,36’sını karşılamaktadır (URL-1, Erişim Tarihi: 01.02.2025). Antalya bölgesi tarım alanı 2020 yılından itibaren yaklaşık %11’lik bir düşüş göstermiştir. Bu düşüşün nedenleri arasında bölgedeki hızlı kentleşme gösterilebilir. Yılmaz ve Terzi’nin 2020 yılında yaptığı çalışmada Antalya bölgesinin geçmişten günümüze hızlı kentleşmenin etkisi altında olduğu belirtilmiştir (Yılmaz ve Terzi, 2020). Hızlı kentleşme drenaj sistemlerinde yetersizlik, daraltılmış akarsu yatakları gibi problemleri beraberinde getirmektedir. Buna benzer altyapı ve şehirleşme konusundaki aksaklıklar, ani yağışlar sonrasında şehir merkezlerinde ciddi can ve mal kaybı oluşturacak taşkınları beraberinde getirme riskini barındırmaktadır (Du vd., 2020). Bu yönüyle ele alındığında, bölgede öncelikli ekonomik faaliyetler arasında yer alan tarımsal ve turistik faaliyetlerin afetler kaynaklı etkilenmesi hem yerel hem de ulusal anlamda ciddi ekonomik kayıplara yol açacaktır.

Rize DKH sınırları içerisinde bulunan ve yıllık toplam yağış yüksekliği bakımından Türkiye’nin en yüksek yağış alan ilidir. Rize’de uzun dönem gözlemlerine göre ortalama yıllık toplam yağış 2300mm civarındadır. Bölge Karadeniz İklim özelliklerini göstermektedir. Bölge yıl boyunca yağışlıdır. Ortalama sıcaklık kış aylarında 6-9°C, yaz aylarında ise 18-24°C civarındadır. Rize yüksek yamaçları ve dağlık topografik yapısı nedeniyle hidrolojik açıdan zorlu bir bölgedir. Rize’de şiddetli yağışlara bağlı olarak sıklıkla toprak kayması ve taşkın gibi afetler gözlenmektedir (Aktürk ve Hauser, 2021). Rize’de engebeli topografya nedeniyle ekilebilir alanlar oldukça azdır. Bu nedenle Rize’nin tarım alanları, Türkiye’nin toplam tarım alanının %0,23’ünü oluşturmaktadır (URL-1, Erişim Tarihi: 01.02.2025).



Şekil 1. Çalışma Bölgeleri: Antalya ve Rize

Antalya ve Rize illeri farklı coğrafi bölgelerde bulunan illerdir. Antalya ve Rize'nin iklimsel ve hidrolojik dinamikler açısından hem benzer hem de farklı özellikleri bulunmaktadır. Antalya ili Akdeniz iklim özelliklerini göstermektedir, yaz aylarında sıcaklık ortalaması yüksek ve kurak geçiren Antalya ili, Toros dağlarının da etkisiyle kış aylarında yüksek yağış ortalamasına sahiptir. Rize ili ise Karadeniz iklimi etkisi altındadır ve her mevsim yağışlıdır. Antalya ili ve Rize ili topografik olarak benzer hidrolojik zorluklar ile karşı karşıyadır. İki ilde de taşkınlar önemli bir risk faktörü olarak sayılabilmektedir. Bu nedenle çalışma farklı iklim özellikleri etkisi altında, benzer hidrolojik zorluklara sahip iki bölgede gerçekleştirilmiş ve karakteristik iklim özelliklerinin etkisi altında yüzeysel akışa mekânsal iklim değişikliği etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma bölgeleri Şekil 1'de gösterilmektedir.

Yağış Sınıflandırması

Yağışın sınıflandırması farklı yağış rejimlerinin belirlenmesi ve yağış rejimleri (RR) arasındaki geçişin ortaya konulması için önemli bir husustur (Yılmaz, 2018). Yağış sınıflandırması yıl içerisinde gözlenen aylık yağış miktarının farklı yöntemler kullanılarak gruplanması esasına dayanmaktadır. Bu çalışmada yağış sınıflandırması aylık toplam yağış değerlerinin ortalaması (P_{ort}) esas alınarak yapılmıştır. Sınıf alt ve üst değerlerinin belirlenmesi için, aylık yağış verilerinin standart sapmalarının ortalaması alınmış ($P_{s-sapma}$) ve ortalama değer ile kullanılmıştır. Tablo 1'de illere göre yağış sınıflandırma değerleri gösterilmiştir.

Tablo 1. Yağış Rejimi Belirlenmesi İçin Kullanılan Yağış Sınıf Sınırları

Yağış Sınıfı ^a	Durum	Antalya Sınır Değerleri (mm/ay)	Rize Sınır Değerleri (mm/ay)
1	Şiddetli Kuraklık	$P=0$	$P=0$
2	Kuraklık	$0 < P < 27,70$	$0 < P < 38,60$
3	Ortalama Yağış	$27,70 \leq P < 148$	$38,60 \leq P < 116,70$
4	Sulak	$148 \leq P < 208,20$	$116,70 \leq P < 272,70$
5	Aşırı Sulak	$P \geq 208,20$	$P \geq 272,70$

^a Sınıfların sınır değerleri en alt sınırdan en üst sınıra doğru sırasıyla; $P_{ort} - 2 * P_{s-sapma}$, $P_{ort} - P_{s-sapma}$, P_{ort} , $P_{s-sapma}$ ve $P_{ort} + 2 * P_{s-sapma}$ şeklinde belirlenmiştir. Burada en alt sınırdan negatif olan değerler dikkate alınmamıştır.

Kullanılan Veriler

Çalışmada incelenen bölgelerde yağış (P , [mm]), sıcaklık (T , [°C]) ve yüzeysel akış (Q , [m³/s]) verilerinin zamansal ve mekânsal değişimi modellenmiş ve iklim değişikliği etkisi altında değerlendirilmiştir. Yağış rejimindeki değişikliklerin bölgesel su planlaması ve toplumsal önemli etkileri bulunmaktadır (Ouara vd., 2014). Bu nedenle çalışmada tarihsel gözlem verileri kullanılarak yağış verileri beş farklı sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıf değerleri yağış rejiminin izlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Referans periyotta istasyonlar için aylık ortalama yağış rejimi değeri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler tahminleyici bir parametre olarak geliştirilen yağış-akış modelinde girdi setinde kullanılmıştır. Gelecek periyotta yüzeysel akış değişiminin incelenmesi amacıyla RCP8.5 emisyon senaryosu etkisi altında GFDL-ESM2M ve HadGEM2-ES modellerinin projeksiyon verileri kullanılmıştır. GFDL modelleri Amerika Birleşik Devletleri tarafından geliştirilen, atmosfer, okyanus kara yüzeyi ve biyolojik süreçleri temsil eden bir model olarak tasarlanmıştır (Liu vd., 2022). HADGEM modeli ise Birleşik Krallık tarafından geliştirilen GFDL modeline ek olarak deniz buzu, karbon döngüsü ve kimyasal süreçleri de dikkate alan bir modeldir (Haywood vd., 2014). Çalışmada seçilen bu iki modelin RCP8.5 senaryosu etkisi altında sıcaklık toleransının yüksek olduğu ortaya konulmuştur (Demircan vd., 2017). RCP8.5 senaryosu atmosferdeki sera gazı konsantrasyonunun 22. yüzyıla kadar sürekli artacağını esas alan senaryo olduğundan bir bölgedeki iklim değişikliği etkileri araştırılırken en elverişsiz koşulların araştırılması için kullanılabilir bir senaryodur.

Tablo 2. Antalya İçin Kullanılan Tarihsel Gözlem ve Projeksiyon Verilerinin İstatistiksel Özellikleri

Veri Seti ^a	Ortalama	Std. Sapma	Minimum	Medyan	Maksimum	Çarpıklık	Basıklık
TAR ^b -Q	63,24	54,76	0	49,64	301,97	1,13	1,37
TAR-P	87,83	113,49	0	37,65	780,8	1,81	4,01
GFDL ^c -P	40,11	42,7	0	27,25	298,5	1,81	4,45
HADGEM ^d -P	87,43	82,84	0	62,5	642,1	1,68	4,46
TAR-T	19,067	6,442	7,641	18,583	31,155	0,13	-1,36
GFDL-T	13,852	7,865	-0,2	13,55	31,6	0,15	-1,23
HADGEM-T	16,95	8,282	2,4	16,5	33,6	0,21	-1,2

^aQ [m³/s], P [mm], T [°C], ^bTarihsel veri seti, ^cGFDL-ESM2M veri seti, ^dHadGEM2-ES veri seti

Böylece araştırma bölgesinde ekstrem sonuçların elde edilmesini kolaylaşacağından araştırma bulguları en olumsuz durumu temsil edebilecektir. Tarihsel gözlem verileri, her çalışma bölgesi için aylık periyotta temin edilmiştir. Çalışmada Antalya analizlerinde kullanılan tarihsel veriler ve projeksiyon verilerine ilişkin istatistiksel detaylar Tablo 2’de, Rize iline ilişkin detaylar Tablo 3’te gösterilmektedir.

Tablo 3. Rize İçin Kullanılan Tarihsel Gözlem ve Projeksiyon Verilerinin İstatistiksel Özellikleri

Veri Seti ^a	Ortalama	Std. Sapma	Minimum	Medyan	Maksimum	Çarpıklık	Basıklık
TAR ^b -Q	3,786	1,949	0,3	3,389	12,615	1,44	3,35
TAR-P	194,66	106,93	8,2	182,3	516	0,71	0,27
GFDL ^c -P	132,92	71,71	0,35	133,34	274,01	-0,07	-1,28
HADGEM ^d -P	168,35	80,25	7	170,54	347,07	0,03	-1,22
TAR-T	15,265	6,645	3,584	14,613	26,797	0,09	-1,37
GFDL-T	12,061	6,56	-2,321	12,122	24,91	-0,09	-1,23
HADGEM-T	15,305	7,296	0,637	15,503	31,552	0,03	-1,22

^aQ [m³/s], P [mm], T [°C], ^bTarihsel veri seti, ^cGFDL-ESM2M veri seti, ^dHadGEM2-ES veri seti

Markov Zinciri Yöntemi

Markov Zinciri bir sistem içerisindeki farklı durumların birbiri arasındaki geçişlerinin incelendiği ve modellendiği stokastik bir süreçtir. Bu yöntem sistemin mevcut durumunun bir önceki duruma bağlı olduğu Markov özelliğine dayanmaktadır (Ross, 2014). Bu yöntem sistemin geçmiş durumlarını hatırlamadığını, sadece mevcut durumun geleceği belirlediğini varsaymaktadır. Çalışmada aylık yağış rejimleri arasındaki geçişler incelenmiştir. Ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak belirlenen sınırlara göre 5 farklı rejim belirlenmiştir. Bunlar sırasıyla; Şiddetli Kuraklık (ŞK), Kuraklık (K), Ortalama Yağış (OY), Sulak (S) ve Aşırı Sulak (AS) olarak isimlendirilmiştir. Markov zinciri yöntemi geçiş olasılıklarını belirlemek için geçiş matrisi oluşturmaktadır. Bu matris kare bir matristir. Matrisin boyu durum sayısına eşit olmaktadır (n*n) (Ross, 2014). Geçiş matrisi $P=[p_{ij}]$ olarak gösterilmektedir. Burada p_{ij} , i. durumdan j. duruma geçiş olasılığını göstermektedir. Geçiş olasılıkları Eşitlik 1’deki koşulu sağlamalıdır (Norris, 1997).

$$\sum_{j=0}^n p_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (1)$$

Buradaki geçiş olasılıkları tarihsel veriler kullanılarak hesaplanmaktadır ve tüm geçiş olasılıkları toplamının 1 (%100) olması beklenmektedir (Norris, 1997). Geçiş olasılıklarının hesaplanması aşamasında her bir durumdan diğer durumlara yapılan geçişler sayılır ve bu sayılar toplam geçiş sayısına bölünerek olasılıklar elde edilir. Bu hesaplama Eşitlik 2’de gösterilmektedir (Norris, 1997). Burada n_{ij} i. durumdan j. duruma geçiş sayısını göstermektedir.

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{k=1}^n n_{ik}} \quad (2)$$

TAHMİNLEYİCİ YÖNTEMLER VE MODEL TASARIMI

Çalışmada yağış rejimi değişikliklerine karşılık gelecekteki akış tepkilerinin bulunması amacıyla tahminleyici yöntemler kullanılarak, gelecekteki aylık akış değerleri tahmin edilmiştir. Tahmin modellerinde P, RR ve T aylık verileri tahminleyici, Q aylık verisi ise tahmin edilen parametre olarak kullanılmıştır.

Tahmin modelinin oluşturulması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalardan ilki kalibrasyon ikincisi ise test aşamasıdır. Bu iki aşamada da tarihsel gözlem verileri kullanılmıştır. Kalibrasyon aşamasında gözlem periyodu içerisinde elde edilen veriler kullanılarak tahmin modeli oluşturulmuş olup ilk aşama kontrolü yapılmıştır. Burada performansı yeterli olan modeller ikinci aşama olan test aşamasında daha önce kullanılmamış veriler kullanılarak test edilmiş ve tahmin modeli oluşturulmuştur. Bu aşamadan sonra gelecekteki akış değerlerinin belirlenmesi amacıyla model projeksiyon verileri kullanılarak çalıştırılmış ve gelecekteki değerlerin tahmini yapılmıştır.

Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS)

Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS) yöntemi regresyon esaslı bir tahminleme işlemi gerçekleştirmektedir (Babacan vd., 2024). Modelin temel çalışma prensibinde girdi verilerinden temel fonksiyonlar (TF) üretmek, fonksiyonlardan eğriler elde etmek ve bu eğrileri belirlenen noktalardan kesiştirmek ile başlamaktadır.

Kesiştirme işleminin tamamlanmasının ardından budama işlemi gerçekleştirilmekte ve tahmin fonksiyonu (PF) elde edilmektedir. Modelin tahminleri burada elde edilen tahmin fonksiyonu kullanılarak yapılmaktadır. MARS modeli ile ilgili detaylı bilgiye Friedman (1991), hidrolojik zaman serilerinde kullanımı ile ilgili detaylı bilgiye ise Babacan vd., 2022, Yin vd., 2018 kaynaklarından erişilebilir. Çalışmada geliştirilen MARS tahmin modelinde, tasarımcı tarafından karar verilecek olan önemli parametreler sırasıyla; maxTF, Penalty ve Serbestlik Derecesi (SD) olarak sayılabilir. Bu değerlerin veri setlerine göre uyarlanması konusunda literatürde önerilen bir yöntem olmadığından, bu parametreler sırasıyla [5 75], [0 1] ve [1 2] aralığında deneme-yanılma yöntemiyle belirlenmiştir.

Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay Sinir Ağları (YSA) belirli bir veri setinde bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki sayısal ilişkinin modellenmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. (Humphrey vd., 2016). YSA'nın kullandığı veri seti girdi verileri (bağımsız değişkenler) ve hedef verilerini içermektedir. YSA farklı katmanlar arasında veri aktarımı yaparak genel çalışma prensibini oluşturmaktadır. YSA tarafından oluşturulan genel katmanlar, verilerin dış dünyadan alındığı girdi katmanı, verilerin çeşitli transfer fonksiyonları kullanılarak aktarıldığı gizli katman veya katmanlar ve yine transfer fonksiyonu kullanılarak verinin çıktı olarak oluşturulduğu çıktı katmanı olarak tanımlanabilmektedir. YSA genel olarak eğitim ve test aşamaları ile geliştirilmektedir. Eğitim aşamasında hedef değişkenin belli olduğu bir veri seti kullanılır ve ağın tahmin için kullanacağı katsayılar oluşturulur. Ağın yaptığı tahminlerin hedef değerler ile kıyaslanması sonucu çalışmada kullanılan geri yayılım algoritması gibi algoritmalar çıktıya göre katsayı optimizasyonu yapar ve hatayı minimize edecek şekilde yeni çıktı oluşturur. Bu işlemin tamamlanmasından sonra YSA hedef verilerin kullanılmadığı yeni bir veri setiyle başlatılır ve hedef verileri üretmesi sağlanır. Burada yeterli performans değerine erişen model yapısı belirlenerek gelecek tahminleme işlemlerinde kullanılır. YSA ile ilgili detaylı bilgi Wang vd., 2006, hidrolojik zaman serilerine uygulanması ile ilgili detaylı bilgi Wu ve Chau, 2010 ve Sharma vd., 2022 kaynaklarına bakılabilir. YSA tasarımında önemli olan bazı seçimler tasarımcı tarafından yapılmaktadır. Bu parametreler genel olarak gizli katman sayısı, gizli katmandaki nöron sayısı, transfer fonksiyonu seçimi ve öğrenme algoritması seçimi olarak sayılabilir. Çalışmada YSA tasarımında gizli katman sayısı 1, gizli katman sayısındaki nöron sayısı [1 10], transfer fonksiyonu tanjant sigmoid ve öğrenme algoritması Levenberg-Marquardt olarak belirlenmiştir.

Karar Ağaçları Yöntemi (CART)

Literatürdeki adıyla CART (Classification and Regression Tree) modeli Breiman vd. tarafından 1984 yılında geliştirilen bir yöntemdir (Breiman vd., 1984). Bu yöntem girdi verilerini belirli kurallar çevresinde alt dallara ayırarak sınıflandırma işlemi yapmaktadır. Bu yöntemin kullanılması diğer makine öğrenmesi yöntemlerine benzer şekildedir. CART yönteminde girdi değişkenleri ve hedef değişken bulunmalıdır. Bir karar ağacının oluşturulması en genel haliyle üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar sırasıyla; öznitelik seçimi, ağaç yapısının oluşturulması ve budama olarak sıralanabilir (Farzin vd., 2025). Öznitelik seçimi esnasında Gini katsayısı kullanılarak her bir değişkenin veri kümesini bölme yeteneği değerlendirilir. Belirlenen en iyi öz niteliklere göre dallandırarak ağaç yapısı oluşturulur. Oluşturulan ağaç yapısında aşırı öğrenmeyi engellemek amacıyla budama işlemi gerçekleştirilerek optimum karar ağacı yapısı elde edilmiş olur (Lu vd., 2022).

BULGULAR

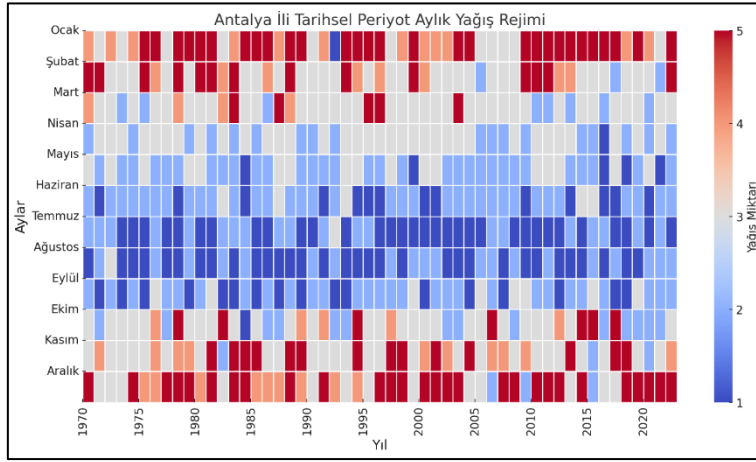
Tarihsel Dönem ve Projeksiyon Dönemi Yağış Rejimi Bulguları

Çalışma kapsamında tarihsel dönemdeki ve gelecek dönemdeki yağış rejiminin değişimini anlamak amacıyla gözlenen yağış verileri kullanılarak Antalya ve Rize için yağış sınıflandırmaları yapılmıştır. Tarihsel yağış verileri kullanılarak 5 farklı yağış sınıfı belirlenmiştir. Yağış sınıfları Tablo 1'de gösterilmiştir. Yağış sınıflandırması farklı yıllarda farklı aylarda gerçekleşen toplam yağış değerlerinin değişimini, yıllık yağış değişimini ve farklı yağış rejimleri arasındaki değişimi için bir gösterge olarak kullanıldığından hidrolojik araştırmalarda önemli bir aşamadır.

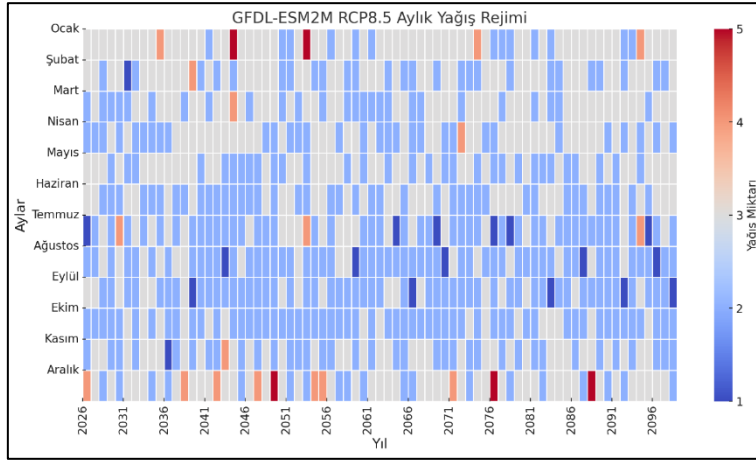
Antalya ili için gerçekleştirilen sınıflandırmada Antalya ilinde tarihsel gözlem periyodu olan 1970-2022 yıllarında aylık yağış rejimi değişimi Şekil 2'de gösterilmektedir. Tarihsel periyotta Antalya bölgesine en çok yağışın Ocak ve Aralık aylarında düştüğü, yaz aylarının ise "Şiddetli Kurak" ve "Kurak" geçtiği görülmektedir. Yoğun yağışlı olan kış aylarında yağış rejiminin genellikle çalışmada belirlenen sınıflandırmaya göre sıralı bir biçimde değiştiği görülmüş ve rejim geçişlerinin keskin olduğu durumların nadir olduğu belirlenmiştir.

Antalya ili karakteristik Akdeniz iklim tipi özelliklerini göstermektedir. Tarihsel dönem çıktıları bölgenin kış aylarında daha yüksek yağış miktarı olduğunu ve yağış rejimi geçişlerinin sulak rejimler arasında olduğunu

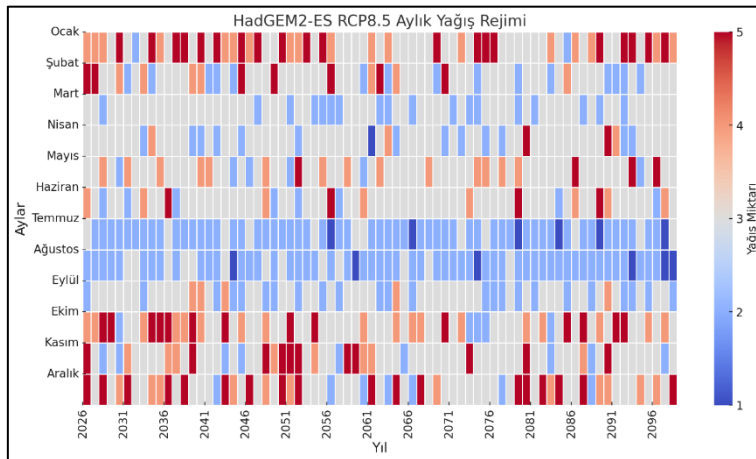
göstermiştir. Bölgede projeksiyon verisi olarak seçilen HadGEM ve GFDL veri setlerine göre yağış rejimi değişimi sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 2. Antalya Tarihsel Dönem Aylık Yağış Rejimi Değişimini Gösteren Isı Haritası



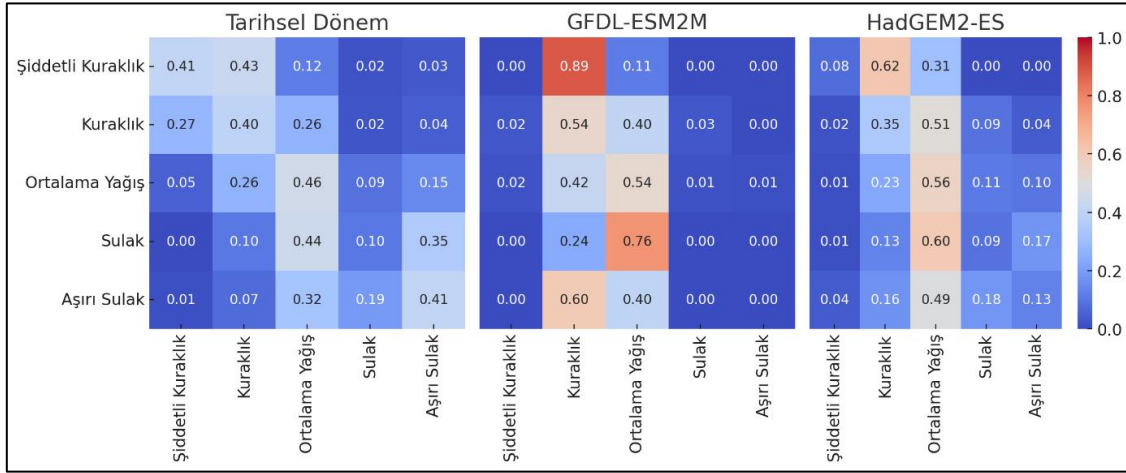
Şekil 3. Antalya GFDL-ESM2M (RCP8.5) Projeksiyon Setine Göre Gelecek Dönem Aylık Yağış Rejimi Değişimini Gösteren Isı Haritası



Şekil 4. Antalya HadGEM2-ES (RCP8.5) Projeksiyon Setine Göre Gelecek Dönem Aylık Yağış Rejimi Değişimini Gösteren Isı Haritası

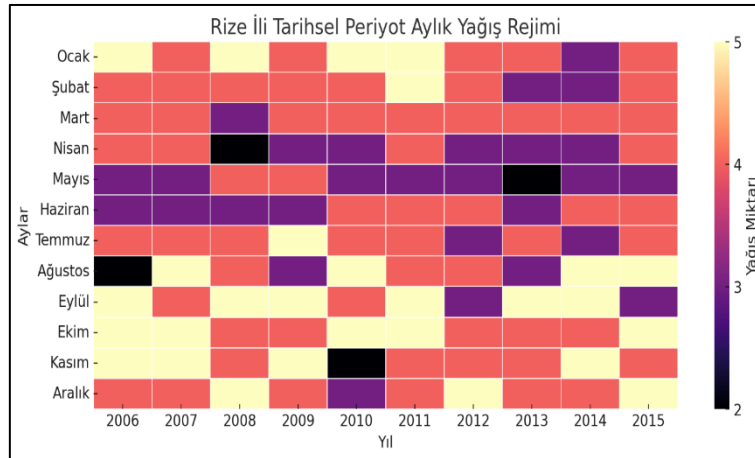
Antalya ili gelecek dönemde farklı veri setlerine göre farklı bulgular elde edilmiştir. GFDL veri seti daha kurak, HadGEM veri seti ise buna göre daha sulak bir görüntü ortaya çıkarmıştır. Her iki projeksiyon veri seti için de yağış rejimleri arasındaki şiddetli geçişler tarihsel döneme göre daha fazla gerçekleşmiştir. Tarihsel dönem ve farklı projeksiyon veri setlerine göre elde edilen gelecek dönem MZ geçiş matrisleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Burada

matristeki düşey eksen ve yatay eksenlerin kesişimlerinde görülen sayılar ondalık olarak geçiş ihtimalini göstermektedir.

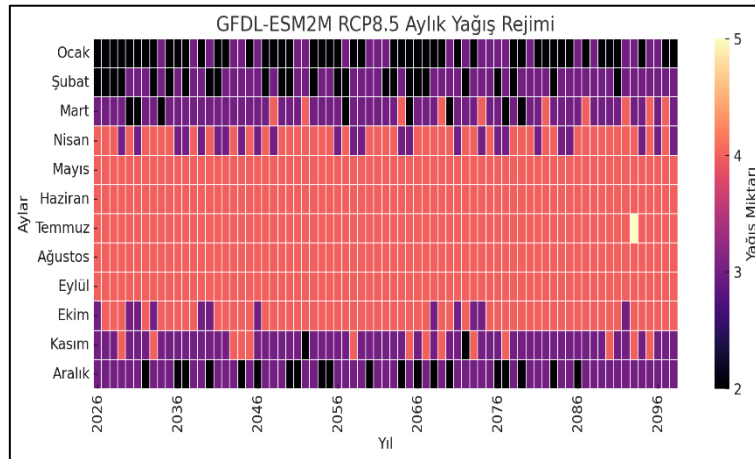


Şekil 5. Antalya Tarihsel Dönem ve Gelecek Dönem Markov Zinciri Geçiş Matrisleri

Rize ili Türkiye'nin en fazla yağış alan bölgesidir. Bu bölgede Karadeniz tipi iklim özelliği göstermesi nedeniyle yıl boyunca sürekli yağış gözlenmektedir. Bölgede tarihsel dönem olan 2006-2015 dönemi boyunca "Şiddetli Sulak" ve "Sulak" yağış rejimlerini sıklıkla yaşamıştır. Bölgede her mevsim yağış gözlenirse de özellikle Eylül aylarında "Şiddetli Sulak" rejim hakimdir. Tarihsel periyotta gözlenen aylık yağış rejimleri Şekil 6'da gösterilmiştir.

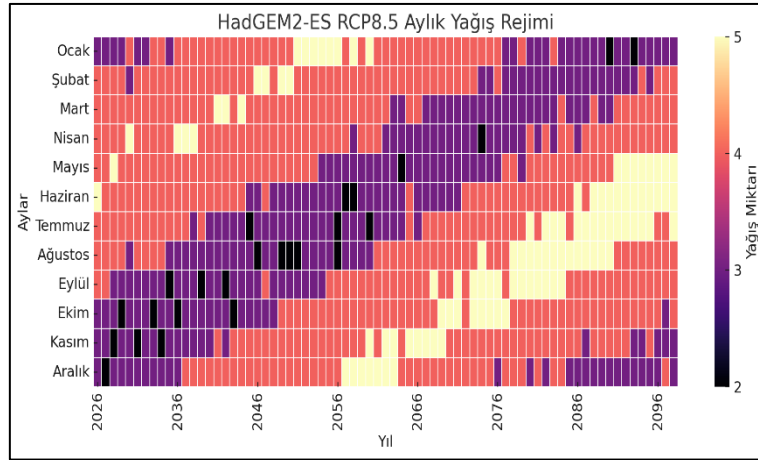


Şekil 6. Rize Tarihsel Dönem Aylık Yağış Rejimi Değişimini Gösteren Isı Haritası



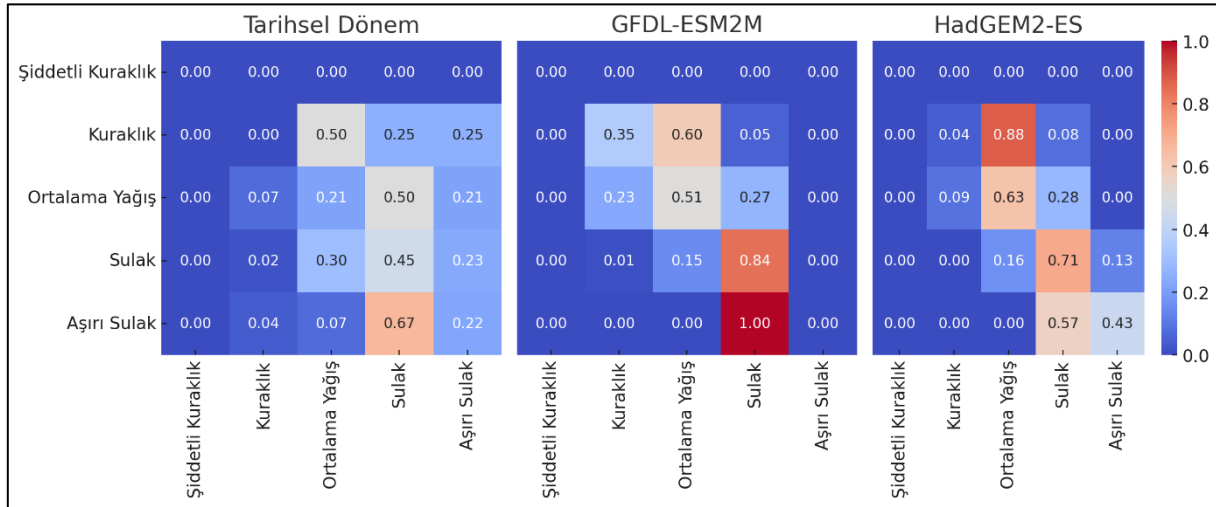
Şekil 7. Rize GFDL-ESM2M (RCP8.5) Projeksiyon Setine Göre Gelecek Dönem Aylık Yağış Rejimi Değişimini Gösteren Isı Haritası

Antalya ili için incelenen iki farklı projeksiyon veri setinin Rize ili için de incelemesi yapılmıştır. Atmosferdeki sera gazı konsantrasyonunun 2100 yılına kadar sürekli artacağını öngörmesi nedeniyle en olumsuz senaryo olan RCP8.5 etkisi altında GFDL-ESM2M ve HadGEM2-ES veri setleri için incelenen yağış rejimi değişimi grafikleri Şekil 7 ve Şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 8. Rize HadGEM2-ES (RCP8.5) Projeksiyon Setine Göre Gelecek Dönem Aylık Yağış Rejimi Değişimini Gösteren Isı Haritası

Yağış rejimleri arasındaki geçişin anlaşılmasını kolaylaştıracak olan MZ geçiş matrisi Şekil 9’da görülmektedir. Rize ilinde yağış rejimleri arasındaki geçişlerde sınıfların sıralı bir biçimde geçtiği belirlenmiştir. Tarihsel dönemde yağış rejimleri arasındaki geçişlerin kararsız durumları projeksiyon verilerinde gözlenmemiştir.



Şekil 9. Rize Tarihsel Dönem ve Gelecek Dönem Markov Zinciri Geçiş Matrisleri

En Uygun Tahmin Modelinin Belirlenmesi

Çalışmada incelenen illerde tarihsel veriler kullanılarak aylık akış tahmini yapılmıştır. Aylık akış tahmini yapılması amacıyla hazırlanan girdi setinde Ay, Aylık Yağış Rejimi, Bir Önceki Ayın Yağış Rejimi, Aylık Toplam Yağış ve Aylık Ortalama Sıcaklık verileri yer almıştır. Tahminleyici yöntem seçiminde literatürde yaygın olarak kullanılan korelasyon katsayısı (R) ve Ortalama Hataların Karesinin Karekökü (RMSE) katsayıları kullanılmıştır. Veri setine en uygun tahmin yönteminin belirlenmesi amacıyla YSA, MARS ve CART yöntemleri kullanılarak tahminler yapılmıştır. Tahmin performansı en yüksek olan model kalibrasyonu yapılmış tahmin modeli olarak gelecek akışın tahmin edilmesi amacıyla tekrar çalıştırılmıştır.

En yüksek performans kriterini sağlayan yöntem ile oluşturulmuş modelde, gelecek periyotta karşılaşılabilecek beklenen değerler girdi verisi olarak kullanılmış ve gelecek akış tahmini yapılmıştır. Burada yapılan akış tahminleri yağış rejimi değişiminin, sıcaklık ve toplam yağış değişiminin etkisiyle gelecekteki akış miktarlarını yansıtmaktadır. Tablo 4’te kalibrasyon aşamasında kullanılan tahminleyici yöntemlere göre performans indislerinin değeri gösterilmiştir.

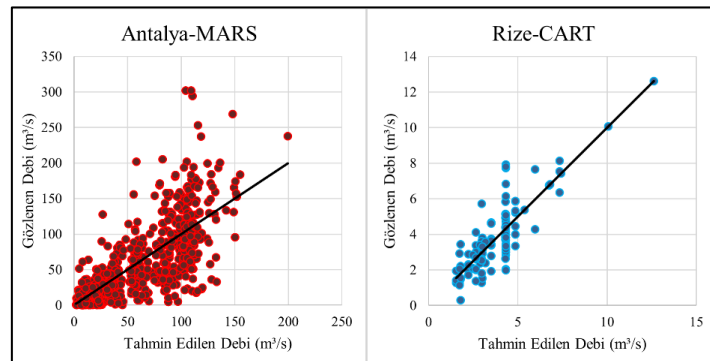
Tablo 4. Çalışma Bölgelerinde Farklı Tahmin Yöntemleriyle Geliştirilen Modellerin Performans İndisleri

Yöntem ^a	Antalya		Rize	
	R	RMSE	R	RMSE
YSA	0,679	42,445	0,692	1,406
MARS	0,740	36,793	0,523	1,655
CART	0,680	40,190	0,843	1,045

^a En iyi modelin geliştirildiği model yapısının sonuçları koyu sembol kullanılarak gösterilmiştir.

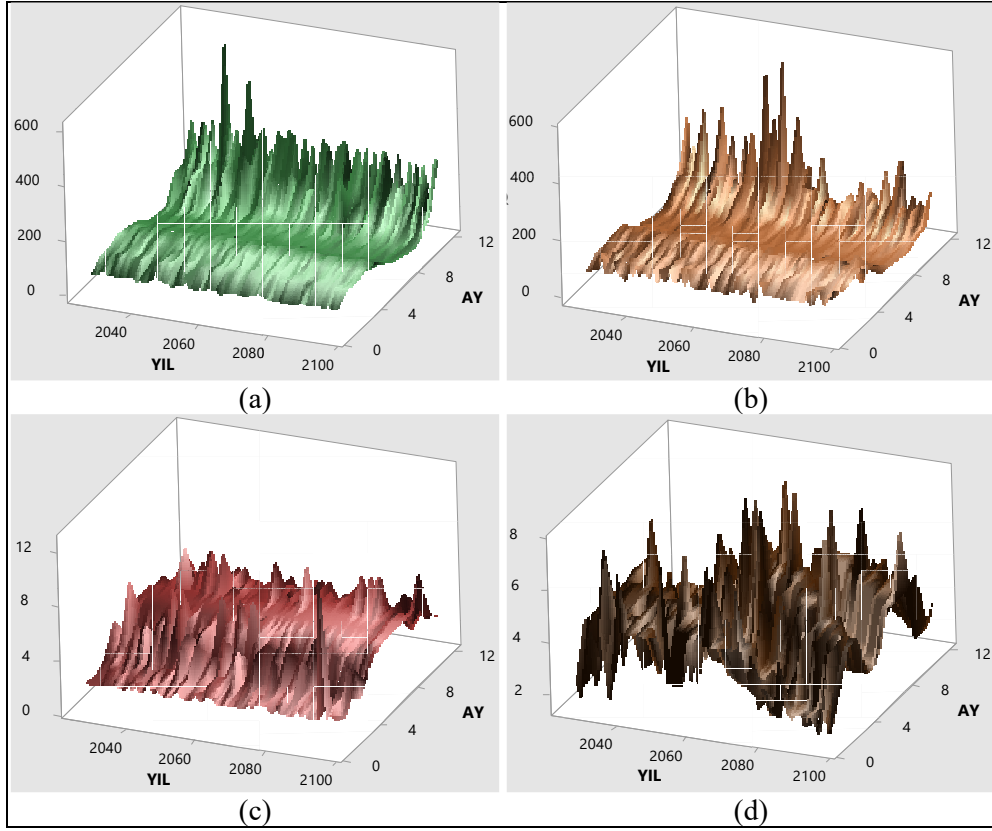
Antalya ve Rize ili için en yüksek performans değerine ulaşan yöntemler birbirinden farklı olarak belirlenmiştir. Bu durum, bölgelerdeki Mİ istasyonu ile AGİ arasındaki topografik seviye farklılıkları, kuş uçuşu mesafe gibi doğal etkenlerin ayrıca yağış verilerindeki ani artış ve azalışlara akış verilerindeki tepkinin uyumsuzluğunun bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Antalya’da başarılı olan MARS modelinde maxTF 45, Penalty değeri 1 ve SD değeri 1 olarak kullanılmıştır. Burada MARS modeli 45 temel fonksiyon üreterek tahmin fonksiyonu oluşturmuştur. MARS modelinde tahminde kullanılan temel fonksiyonlarda geçme sırasına göre en önemli parametreler ay (%100), Yağış (%34,20), Sıcaklık (%24,70) ve Yağış Rejimi (%17,31) olmuştur. Bu durum her yıl için 1-12 aralığında kullanılarak veri setinde periyodikliğin sağlandığı durumlarda tahmin başarısının artacağını göstermektedir.

Rize ilinde başarılı olan karar ağacı modeli olan CART olmuştur. CART modelinde kategorik değişken olarak ay veri seti kullanılmıştır. Verilerin ayrı kategorilere ayrılmasında her yıl periyodik tekrar eden bu sabit değerlerin tahmin performansına olumlu katkısı olmuştur. CART modelinde sınıflandırma işlemi Gini Katsayısına göre yapılmıştır. CART modelinde karar ağacı oluştururken eksik verilerin tamamlandığı Surrogate Splits (Vekil Sayısı) 5 olarak belirlenmiştir. Böylece modelin ana bölme değişkeninde eksik verileri tamamlarken en fazla 5 vekil değişken kullanması amaçlanmıştır. CART modeli debi tahmininde modelde bölünme işleminde yaptığı katkıya göre veri seti önemi belirlenmektedir. Önem düzeyi yüksekten düşüğe doğru sırasıyla Yağış (%100), Sıcaklık (%42,46), Yağış Rejimi (%21,98), Ay (%11,57) şeklinde sıralanabilir. Rize’nin topografik yapısının ve istasyonlar arasındaki seviye farklılığının ani değişimlerin akışa yansımaması durumunun karar ağacı modelinin başarılı sonuç üretmesi konusunda etkisi olmuştur. Antalya ve Rize illerinin kalibrasyon dönemi saçılım diyagramları Şekil 10’da görülmektedir.

**Şekil 10.** Antalya ve Rize Kalibrasyon Dönemi Saçılım Diyagramları

Aylık Ortalama Akış Değişimi Bulguları

Farklı iklim özellikleri gösteren Antalya ve Rize için benzer koşulları taşıyan istasyonlar seçilerek GFDL-ESM2M ve HadGEM2-ES veri setlerinin zamansal ve mekânsal farklılıkları ortaya koyulmuştur. Bu amaçla her iki bölge için tarihsel veriler kullanılarak kalibre edilen tahmin modelleri kullanılarak gelecek aylık ortalama debi değerleri için tahmin yapılmıştır. Tahmin sonuçlarının gösterildiği diyagram Şekil 11’de gösterilmektedir. Tahmin modellerinin sonuçlarının tutarlılığı tarihsel veriler kullanılarak sınanmış ve çalışma alanları için güvenilir sonuçlar ürettiği görülmüştür. Antalya ili yılın belirli dönemlerinde yağış alan ve yaz aylarını kurak geçiren bir bölgedir. MARS modeli ile gerçekleştirilen tahminlerde bölgede yağışın yoğun olduğu aylarla uyumlu değişen debi değerleri görülmektedir. Bölgede özellikle kış aylarındaki yüksek akışlar dikkati çekmektedir. Rize’de yıl boyunca sürekli görülen yağış akış değerlerinin dağılımını etkilemiştir. Farklı projeksiyon veri setlerinden elde edilen akış verileri Rize ili için değişiklik göstermiştir. GFDL-ESM2M veri setine göre yapılan tahminlerde veri dağılımı zamana bağlı olarak düzenli gerçekleşmiş ve pik değerler daha az görülmüştür, HadGEM2-ES veri setine göre yapılan tahminlere göre akış değerlerindeki değişkenlik dikkat çekmektedir. Zamana bağlı olarak debi değerlerinin değişim aralığı daha geniş olmuştur.



Şekil 11. Çalışma Bölgelerine Göre Gelecek Aylık Ortalama Debi Değerlerinin Yıllara Göre Gösterimi (a) GFDL-ESM2M Veri Setine Göre Antalya Tahmini (b) HadGEM2-ES Veri Setine Göre Antalya Tahmini (c) GFDL-ESM2M Veri Setine Göre Rize Tahmini (d) HadGEM2-ES Veri Setine Göre Rize Tahmini

TARTIŞMA

Bu çalışma literatürde kapsamlı bir uygulaması olmayan, çok yönlü bir metodolojik çerçeve içerisinde yürütülmüştür. Rize ve Antalya gibi benzer özellikleri bulunan farklı enlemlerdeki kıyı bölgelerinde hem tarihsel hem de projeksiyon verilerinin dikkate alındığı yağış rejimi geçiş matrisleri MZ yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Yağış rejimi bulgularının ardından MARS, YSA ve CART gibi tahmin yöntemleri kullanılarak geleceğe yönelik akış modelleri gerçekleştirilmiştir. Bu yönüyle çalışma yalnızca mevcut durumu tartışmakla kalmayıp iklim değişikliğinin mekânsal ve zamansal etkilerini tahmin etmeye yönelik uygulamalı ve karşılaştırmalı analizler içermektedir. Farklı enlemlerde bulunan, farklı topografik özelliklere ve iklim tipine sahip olan iki farklı bölgede yapılan çalışmaların karşılaştırmalı şekilde ele alınması projeksiyon modellerinin farklı bölgeler için seçiminde güvenilirliğinin test edilmesi açısından literatüre katkı sağlamaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında geliştirilen yöntemsel yaklaşım kıyı bölgelerinde su yönetimi konularında referans alınabilecek nitelikte bir model önerisi sunmaktadır.

Yağış sınıflandırmaları farklı yıllarda yağışın dağılımının belirlenmesi, farklı yıllardaki aylık yağış rejimleri arasındaki geçişin belirlenmesi için önemli bir indikatör olmuştur. De Luca vd. tarafından 2024 yılında yapılan araştırma iklim değişikliğinin yağış değerleri üzerinde etkin olduğunu, yağış değerlerinin iklim değişikliğinden etkilendiğini ortaya koymaktadır (De Luca vd., 2024). Yağışın iklim değişikliğine olan toleransı yıllık toplam yağış değeri yüksek olan bölgelerde kritik bir araştırma sorusu oluşturmaktadır. Çalışma bulguları Antalya ve Rize ilinde De Luca vd. tarafından 2024 yılında gerçekleştirilen araştırma bulgularına uygun olarak iklim değişikliğinin yağış rejimleri arasındaki geçişleri etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu durum farklı modeller tarafından geliştirilen projeksiyon verilerine göre değişmektedir. Bu durum yapılacak analizlerde veri seti seçiminin çalışma bulgularını etkilediğini göstermiştir.

Antalya ilinde tarihsel dönemde yağış rejimi geçişlerinin çalışmadaki sınıflandırma sırasına uygun olduğu ve bu geçişlerin nadiren sıra atlayarak olduğu görülmektedir. Çalışmada incelenen 1970-2022 yıllarını kapsayan gözlem periyodu boyunca Antalya ilinin yağış rejiminin düzenli olduğu ve bölgenin Akdeniz iklim özelliklerini yansıttığı görülmüştür. Projeksiyon veri setlerinden elde edilen aylık yağış rejimi değişimlerinden elde edilen bulgular aynı

yılları kapsayan dönemlerde, farklı veri setlerine göre farklı sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir. Bu durum veri seti seçiminin önemini vurgulamakta ve Harding vd. tarafından 2012 yılında yapılan araştırma bulgularını desteklemektedir (Harding vd., 2012). Her iki projeksiyon veri setine göre yapılan değerlendirme bölgede gelecekteki yağış miktarında azalış ve buna bağlı kuraklaşma öngörmektedir. Ayrıca bölgede aylık yağış rejimleri arasındaki geçişlerin daha sert olacağını göstermektedir. Bu durum iklim değişikliğinin tarımsal faaliyetler gibi periyodik olarak düzenli su ihtiyacının olduğu sektörlerde uyum stratejilerinin geliştirilmesinin bölge için zorunluluk olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca Markov Zinciri Matrisi incelendiğinde yağış rejimlerindeki geçişlerin keskinleştiği görülmektedir. Bu gibi keskin geçişlerin kurak rejimden daha sulak rejime geçiş oranının yükselmesi esnasında kurumuş toprak yüzeyinin akış katsayısını artırarak konsantrasyon süresini kısalttığı ve bu geçiş durumlarında taşkın riskinin yükselmesi durumunun araştırılmasını gerekli kılmaktadır. Knapp vd tarafından 2015 yılında yapılan araştırma bulguları bu durumu desteklemektedir (Knapp vd., 2015).

Rize ili Türkiye'nin en fazla yağış alan bölgesi konumundadır. Bölgede yağış rejimi tarihsel periyotta Karadeniz iklim tipine uygun bir patern sergilemiştir. Bölgede Eylül ayı itibarı ile "Aşırı Sulak" yağış rejimi başlamakta ve bölgede genel olarak yağışlar bölge ortalama değerinin üzerinde gerçekleşmektedir. Bölgede çok nadir olarak "Kurak" rejim gözlenmektedir. Bu durum bölgenin taşkın riski barındırdığını ve mevcut durumda su stresi yaşanması durumunun beklenmediğini göstermektedir. İklim modellerinde RCP8.5 emisyon senaryosu en olumsuz durumu yansıtmaktadır. Bölgede RCP8.5 etkisi altında incelenen projeksiyon veri setlerine göre farklı yağış rejimleri tespit edilmiştir. GFDL-ESM2M modeli bölgede Ocak ve Aralık aylarında "Kurak" rejim gözleneceğini ve "Aşırı Sulak" rejimin hemen hemen hiç gözlenmeyeceğini göstermiştir. Bu durum yaşanacak iklim değişikliği etkilerinin, bölgede yıllık toplam yağış miktarında kısmen artışa ve aylık "Aşırı Sulak" geçişlerinde azalmaya neden olacağını ve bölgede aşırı yağışa bağlı erozyon ve heyelan gibi felaketlerin sıklığının artabileceğini göstermektedir. Aşırı yağışların heyelan ve erozyon riskinin artışına neden olduğu Wang vd., tarafından 2025 yılında yapılan araştırma ile ortaya konulmuştur (Wang vd., 2025). HadGEM2-ES veri setinde ise yağış rejimlerinde yıllık olarak bir ötelenme öngörülmüş ve GFDL-ESM2M veri setine göre "Aşırı Sulak" rejimin yaygınlaştığı tespit edilmiştir. Bu model çıktıları bölgede heyelan ve erozyon riskinin yanında taşkın riskinin de yüksek olabileceğini düşündürmüştür. MZ geçiş matrisi Rize ilinde tarihsel periyotta yağış rejimlerindeki geçişlerin daha fazla ihtimalli olduğunu göstermektedir. Projeksiyon verileri ile incelenen gelecek dönemde ise yağış rejimlerindeki geçişlerin genellikle sınıf sıralamasına uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum iklim değişikliği etkisinin yağışlar üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisini ortaya koymaktadır.

Antalya ve Rize illeri farklı iklim tiplerinin özelliklerini göstermiş olmasına rağmen benzer hidrolojik zorluklar ile karşı karşıya kalmaktadır. Tarihsel dönem analizleri her iki ilin iklim tipine uygun karakteristik yağış rejimi olduğunu göstermiştir. Bölgelerde farklı projeksiyon veri setleri kullanılarak yapılan incelemelere göre bölgelerde iklim değişikliğinin yağışlar üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisi görülmüştür. Bu etkinin yağış rejimleri arasında keskin geçişlere neden olabileceği ve bu geçişlerin kuraklık durumundan aşırı sulak duruma geçişlerde taşkın riskini artırması beklenmektedir. Yıl boyunca toplam yağış miktarı daha yüksek olan Rize'de aşırı yağışların ve keskin yağış rejimi geçişlerinin etkisi, topografik engebenin yüksekliğiyle birlikte heyelan riskini arttıracaktır. Antalya'da en önemli ekonomik faaliyet olan tarım üzerinde keskin yağış rejimi geçişlerinin erozyon etkisi göstereceği ve verimli yüzey tabakasına zarar vererek tarımsal üretimi etkilemesi beklenmektedir. Yağış rejimi incelenen iki ilde de projeksiyon veri setinin farklı sonuçlara ulaştırdığı görülmüş olup, iklim ile ilgili yapılacak çalışmalarda tek bir veri seti ile çalışmanın bu anlamda güvenilir olmayacağı görülmüştür.

Antalya ve Rize illerinde farklı yöntemlerin tahminleyici olarak en yüksek performans değerine eriştiği belirlenmiştir. Antalya ili için MARS modeli, Rize ili için CART modeli en yüksek performans değerine erişmiştir. Bölgelerdeki veri dağılımı incelendiğinde bu farklılığın bölgelerdeki farklı topografik yapı kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Antalya ili için kıyıda bulunan Mİ'dan AGİ arasındaki kuş uçuşu mesafe yaklaşık 4 km, Rize ilinde kıyıda bulunan Mİ'dan AGİ'ye kadar olan kuş uçuşu mesafe yaklaşık 11 km dolaylarındadır. Bölgelerin topografik yapısı gereği Rize ilinde Mİ ile AGİ arasındaki topografik seviye farkı fazladır. Bu durum Mİ konumunda kaydedilen yağışlara AGİ konumundaki tepkinin gecikmesi ve bazı durumlarda görülmemesi olarak ortaya çıkmıştır. Bu nedenle Rize bölgesindeki tahminlerin, tahmin fonksiyonu oluşturan MARS ve YSA gibi yöntemler ile değil, karar ağacı gibi veri setine göre kuralların oluşturulduğu CART yöntemiyle daha başarılı olduğu görülmüştür.

Gelecek akış tahminlerinden elde edilen sonuçların güvenilirliği kalibrasyon aşamasında sınanmış olduğundan tahmin modellerinin sonuçları kabul edilebilir çıktılar oluşturmıştır. Antalya ilinde projeksiyon veri setlerinden elde edilen debi değerleri arasındaki farklılık düşük olarak gözlenmiştir. Ancak Rize'de yapılan tahmin çıktıları iki veri setine

göre yapılan tahmin bulgularının birbirinden farklı değişime sahip olduğunu göstermektedir. Rize ilinde meteorolojik veriler ile akış verilerinin gözlem istasyonları arasındaki kuş uçuşu mesafenin fazla olması, yağış değişikliklerine karşı mekânsal topografik engeller neticesinde hızlı akış tepkisi ölçülmemesi model tutarlılığını etkilemiştir. Antalya bölgesine göre farklı sonuçlar elde edilmesindeki esas nedenin topografik yapı ve yağışa karşı hızlı gelişen akış tepkisi olduğu söylenebilir. Ayrıca indirgenmiş projeksiyon verilerinin Rize gibi yüksek engebeli topografyalarda istatistiksel olarak yaptıkları ön kabuller ve enterpolasyon adımlarının projeksiyon verilerinin tutarlılığını etkilediği düşünülmektedir. Antalya bölgesi Rize'ye göre daha az engebeye sahiptir ve projeksiyon verilerinin birbiri arasındaki tutarlılık projeksiyon verilerindeki mekânsal değişkenliğin topografik etkenlere bağlı olduğu durumunun daha kolay gözlenmesini sağlamaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma, iklim değişikliğinin Türkiye'nin en fazla yağış alan kıyı bölgeleri olan Rize ve Antalya'da yağış rejimi ve akış dinamiklerine etkisini ortaya koymaktadır. Sonuçlar, yağış rejimlerinin gelecekte keskin geçişler göstereceğini ve bu durumun su kaynakları yönetimi, tarımsal faaliyetler ve taşkın riskleri açısından kritik sonuçlar doğuracağını göstermektedir. Antalya'da yağış miktarında dalgalanmalar nedeniyle kuraklık ve aşırı yağışlar arasında sert geçişler yaşanması beklenirken, Rize'de yoğun yağışlara bağlı olarak heyelan ve taşkın riskleri artacaktır. Yapay zekâ tabanlı tahmin modelleri, özellikle MARS ve CART yöntemleri, gelecekteki akış rejimlerini başarılı şekilde tahmin etmiştir. Farklı projeksiyon veri setlerinin bölgelerde farklı sonuçlar üretebileceği bu çalışma ile görülmüştür. Ayrıca projeksiyon veri setleri kullanılarak geliştirilen akış tahmin modellerinde AGİ ile Mİ arasındaki mekânsal ve topografik farklılıkların fazla olmasının tahmin performansını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Bu çalışma farklı projeksiyon verilerinin bölgesel risk analizlerinde ne kadar önemli olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, kıyı bölgelerinde iklim değişikliğine bağlı hidrolojik etkilerin anlaşılması ve uyum politikalarının geliştirilmesi açısından önemli bir bilimsel yol haritası sunmaktadır. Sonuçlar hem akademik araştırmalar hem de karar vericiler için gelecekteki su yönetimi stratejilerini şekillendirecek niteliktedir.

KAYNAKLAR

- Aktürk, G., & Hauser, S. J. (2021). Detection of disaster-prone vernacular heritage sites at district scale: the case of Fındıklı in Rize, Turkey. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 58, 102238. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102238>
- Ali, M. H., Biswas, P., Hassan, M. Q., & Islam, M. A. (2025). Climate Change and Its Impacts on Hydrological Regimes Over the Bengaldelta. *Results in Engineering*, 103861.
- Atalay, I., Efe, R., & Ozturk, M. (2014). Effects of Topography and Climate on the Ecology of Taurus Mountains in the Mediterranean Region of Turkey. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 120, 142-156. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2014.02.091>.
- Babacan, H. T., & Yüksek, Ö. (2024). Investigation of climate change impacts on daily streamflow extremes in Eastern Black Sea Basin, Turkey. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 134, 103599. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103599>
- Babacan, H. T., & Yüksek, Ö. (2024). Investigation of climate change impacts on daily streamflow extremes in Eastern Black Sea Basin, Turkey. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 134, 103599. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103599>
- Babacan, H. T., Yüksek, Ö., & Saka, F. (2022). Yapay zeka ve sezgisel regresyon yöntemlerinin yağış-akış modellemesi için performans değerlendirmesi: Aksu Deresi için bir uygulama. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3), 744-751. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1079616>
- Bartens, A., Shehu, B., & Haberlandt, U. (2024). Flood frequency analysis using mean daily flows vs. instantaneous peak flows. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(7), 1687-1709. <https://doi.org/10.5194/hess-28-1687-2024>
- Bhuyan, M. D. I., Islam, M. M., & Bhuiyan, M. E. K. (2018). A trend analysis of temperature and rainfall to predict climate change for northwestern region of Bangladesh. *American Journal of Climate Change*, 7(2), 115-134.
- Bola, G. B., Tshimanga, R. M., Neal, J., Trigg, M. A., Hawker, L., Lukanda, V. M., & Bates, P. (2022). Understanding flood seasonality and flood regime shift in the Congo River Basin. *Hydrological Sciences Journal*, 67(10), 1496-1515. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2083966>

- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (2017). Classification and regression trees. Routledge. <https://doi.org/10.1201/9781315139470>
- Cheng, T., Xu, Z., Yang, H., Hong, S., & Leitao, J. P. (2020). Analysis of effect of rainfall patterns on urban flood process by coupled hydrological and hydrodynamic modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(1), 04019061. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001867](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001867)
- Dang, C., Shao, Z., Huang, X., Qian, J., Cheng, G., Ding, Q., & Fan, Y. (2022). Assessment of the importance of increasing temperature and decreasing soil moisture on global ecosystem productivity using solar-induced chlorophyll fluorescence. *Global Change Biology*, 28, 2066–2080. <https://doi.org/10.1111/gcb.16043>
- Danladi Bello, A.-A., Hashim, N. B., & Mohd Haniffah, M. R. (2017). Predicting Impact of Climate Change on Water Temperature and Dissolved Oxygen in Tropical Rivers. *Climate*, 5(3), 58. <https://doi.org/10.3390/cli5030058>
- De Luca, D. L., Ridolfi, E., Russo, F., Moccia, B., & Napolitano, F. (2024). Climate change effects on rainfall extreme value distribution: the role of skewness. *Journal of Hydrology*, 634, 130958. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130958>
- Demircan, M., Gürkan, H., Eskioğlu, O., Arabacı, H., vd. (2017). Climate Change Projections for Turkey: Three Models and Two Scenarios. *Turkish Journal of Water Science and Management*, 1(1), 22-43. <https://doi.org/10.31807/tjwsm.297183>
- Demirtaş, M. (2016). The October 2011 devastating flash flood event of Antalya: triggering mechanisms and quantitative precipitation forecasting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(699), 2336-2346. <https://doi.org/10.1002/qj.2827>
- Dhamodaran, S., & Lakshmi, M. (2020). Comparative analysis of spatial interpolation with climatic changes using inverse distance method. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12, 6725-6734. <https://doi.org/10.1007/s12652-022-04128-w>
- Du, J., Wu, X., Wang, Z., Li, J., & Chen, X. (2020). Reservoir-Induced Hydrological Alterations Using Ecologically Related Hydrologic Metrics: Case Study in the Beiji River, China. *Water*. <https://doi.org/10.3390/w12072008>
- Farzin, S., Anaraki, M. V., Kadjodazadeh, M., & Morshed-Bozorgdel, A. (2025). Novel methodology for prediction of missing values in River flow based on convolution neural networks: Principles and application in Iran country. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 103875. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.103875>
- Filho, G., Coelho, V., Freitas, E., Xuan, Y., & Almeida, C. (2020). An improved rainfall-threshold approach for robust prediction and warning of flood and flash flood hazards. *Natural Hazards*, 105, 2409 - 2429. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04405-x>
- Friedman, J. H. (1991). Multivariate adaptive regression splines. *The annals of statistics*, 19(1), 1-67.
- Grimm, N., Chapin, S., Bierwagen, B., Gonzalez, P., Groffman, P., Luo, Y., Melton, F., Nadelhoffer, K., Pairis, A., Raymond, P., Schimel, J., & Williamson, C. (2013). The impacts of climate change on ecosystem structure and function. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11, 474-482. <https://doi.org/10.1890/120282>
- Harding, B. L., Wood, A. W., & Prairie, J. R. (2012). The implications of climate change scenario selection for future streamflow projection in the Upper Colorado River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), 3989-4007. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3989-2012>
- Haywood, J. M., Jones, A., & Jones, G. S. (2014). The impact of volcanic eruptions in the period 2000–2013 on global mean temperature trends evaluated in the HadGEM2-ES climate model. *Atmospheric Science Letters*, 15(2), 92-96. <https://doi.org/10.1002/asl2.471>
- Humphrey, G. B., Gibbs, M. S., Dandy, G. C., & Maier, H. R. (2016). A hybrid approach to monthly streamflow forecasting: integrating hydrological model outputs into a Bayesian artificial neural network. *Journal of Hydrology*, 540, 623-640. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.026>
- Knapp, A. K., Hoover, D. L., Wilcox, K. R., Avolio, M. L., Koerner, S. E., La Pierre, K. J., ... & Smith, M. D. (2015). Characterizing differences in precipitation regimes of extreme wet and dry years: implications for climate change experiments. *Global change biology*, 21(7), 2624-2633. <https://doi.org/10.1111/gcb.12888>

- Konrad, C. P., Booth, D. B., & Burges, S. J. (2005). Effects of urban development in the Puget Lowland, Washington, on interannual streamflow patterns: Consequences for channel form and streambed disturbance. *Water resources research*, 41(7). <https://doi.org/10.1029/2005WR004097>
- Koutný, L., Skoupil, J., & Veselý, D. (2014). Physical Characteristics Affecting the Infiltration of High Intensity Rainfall into a Soil Profile. *Soil & Water Research*, 9(3).
- Kundu, S., Khare, D., & Mondal, A. (2017). Interrelationship of rainfall, temperature and reference evapotranspiration trends and their net response to the climate change in Central India. *Theoretical and Applied Climatology*, 130, 879-900.
- Leventeli, Y. (2011). Potential Human Impact on Coastal Area, Antalya—Turkey. *Journal of Coastal Research*, (61), 403-407. <https://doi.org/10.2112/SI61-001.48>
- Li, X., Tan, L., Li, Y., Qi, J., Feng, P., Li, B., ... & Chen, Y. (2022). Effects of global climate change on the hydrological cycle and crop growth under heavily irrigated management—A comparison between CMIP5 and CMIP6. *Computers and Electronics in Agriculture*, 202, 107408.
- Lin, L., Lonla, P. Y., Vijayakumar, J., Khan, M. K., Di Emidio, G., Krekelbergh, N., ... & Cornelis, W. (2025). Soil surface properties and infiltration response to crust forming of a sandy loam and silt loam. *Soil and Tillage Research*, 248, 106440.
- Liu, Y., Jia, Z., Ma, X., Wang, Y., Guan, R., Guan, Z., Gu, Y., & Zhao, W. (2022). Analysis of Drought Characteristics Projections for the Tibetan Plateau Based on the GFDL-ESM2M Climate Model. *Remote Sensing*, 14(20), 5084. <https://doi.org/10.3390/rs14205084>.
- Lu, J., Jia, L., Menenti, M., Zheng, C., Hu, G., & Ji, D. (2025). The impacts of drought on water availability: spatial and temporal analysis in the Belt and Road region (2001–2020). *International Journal of Digital Earth*, 18(1), 2449706.
- Mendoza, P., Clark, M., Mizukami, N., Gutmann, E., Arnold, J., Brekke, L., & Rajagopalan, B. (2016). How do hydrologic modeling decisions affect the portrayal of climate change impacts?. *Hydrological Processes*, 30, 1071 - 1095. <https://doi.org/10.1002/hyp.10684>.
- Norris, J.R., (1997). Markov Chains. Cambridge: Cambridge University Press (Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics). ISBN 9780511810633, <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810633>
- Ouarda, T. B., Charron, C., Kumar, K. N., Marpu, P. R., Ghedira, H., Molini, A., & Khayal, I. (2014). Evolution of the rainfall regime in the United Arab Emirates. *Journal of Hydrology*, 514, 258-270. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.032>
- Piacentini, T., Galli, A., Marsala, V., & Miccadei, E. (2018). Analysis of soil erosion induced by heavy rainfall: A case study from the NE Abruzzo Hills Area in Central Italy. *Water*, 10(10), 1314. <https://doi.org/10.3390/w10101314>
- Piguet, E., Pécoud, A., & De Guchteneire, P. (2011). Migration and climate change: An overview. *Refugee Survey Quarterly*, 30(3), 1-23.
- Polson, D., Hegerl, G., & Solomon, S. (2016). Precipitation sensitivity to warming estimated from long island records. *Environmental Research Letters*, 11. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074024>.
- Reis, S. (2008). Analyzing land use/land cover changes using remote sensing and GIS in Rize, North-East Turkey. *Sensors*, 8(10), 6188-6202. <https://doi.org/10.3390/s8106188>
- Rind, D., Rosenzweig, C., Rosenzweig, C., Goldberg, R., & Goldberg, R. (1992). Modelling the hydrological cycle in assessments of climate change. *Nature*, 358, 119-122. <https://doi.org/10.1038/358119A0>.
- Ross, S., (2014) Introduction to Probability Models (Eleventh Edition), Academic Press, Pages 183-276, ISBN 9780124079489, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407948-9.00004-9>.
- Sayat, A., Lyazzat, M., Elmira, T., Gaukhar, B., & Gulsara, M. (2025). Assessment of the impacts of climate change on drought intensity and frequency using SPI and SPEI in the Southern Pre-Balkash region, Kazakhstan. *Watershed Ecology and the Environment*, 7, 11-22.
- Sharma, P., Singh, S., & Sharma, S. D. (2022). Artificial neural network approach for hydrologic river flow time series forecasting. *Agricultural Research*, 11(3), 465-476. <https://doi.org/10.1007/s40003-021-00585-5>

- Skendžić, S., Zovko, M., Živković, I. P., Lešić, V., & Lemić, D. (2021). The Impact of Climate Change on Agricultural Insect Pests. *Insects*, 12(5), 440. <https://doi.org/10.3390/insects12050440>
- Tam, T. H., Abdul Rahman, M. Z., Harun, S., Shahid, S., Try, S., Jamal, M. H., ... & Abdul Wahab, Y. F. (2025). Flood hazard assessment using design rainfall under climate change scenarios in the Kelantan River Basin, Malaysia. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 16(1), 1-19.
- URL-1: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111> Erişim Tarihi: 01.02.2025
- Wang, J., Yang, X., Tao, Z., & Shen, F. (2025). Failure characteristics and instability mechanism of the Hengshanbei catastrophic high-locality landslide in Guangdong, China. *Natural Hazards*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07158-7>
- Wang, W., Van Gelder, P. H., Vrijling, J. K., & Ma, J. (2006). Forecasting daily streamflow using hybrid ANN models. *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 383-399. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.032>
- Wu, C. L., & Chau, K. W. (2010). Data-driven models for monthly streamflow time series prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(8), 1350-1367. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.04.003>
- Y. Lu, T. Ye and J. Zheng, (2022). Decision Tree Algorithm in Machine Learning, IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), Dalian, China, 2022, pp. 1014-1017, doi: 10.1109/AEECA55500.2022.9918857.
- Yılmaz, E. (2018). Türkiye'de aylık yağış eğilimleri, yağış kaymaları ve yağış Eğilim Rejimleri (1971-2010)(Monthly Precipitation Trends, Precipitation Temporal Shifts and Precipitation Trends Regimes in Turkey (1971-2010)). *Journal of Human Sciences*, 15(4), 2066-2091. <https://doi.org/10.14687/jhs.v15i4.5479>
- Yılmaz, M., & Terzi, F. (2020). Characteristics of spatio-temporal urban growth patterns due to the driving forces of urbanization: The Coastal City of Antalya, Turkey. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 8(3), 16-33. https://doi.org/10.14246/irspsd.8.3_16
- Yin, Z., Feng, Q., Wen, X., Deo, R. C., Yang, L., Si, J., & He, Z. (2018). Design and evaluation of SVR, MARS and M5Tree models for 1, 2 and 3-day lead time forecasting of river flow data in a semiarid mountainous catchment. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32, 2457-2476. <https://doi.org/10.1007/s00477-018-1585-2>
- Zhang, H., Liu, G., Zhao, C., Zhang, L., Zhang, Q., Fu, H., & Cao, S. (2023). Loess erosion change modeling during heavy rainfall. *International Journal of Sediment Research*, 38(1), 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2022.08.004>
- Zhang, P., Sun, W., Xiao, P., Yao, W., & Liu, G. (2022). Driving Factors of Heavy Rainfall Causing Flash Floods in the Middle Reaches of the Yellow River: A Case Study in the Wuding River Basin, China. *Sustainability*, 14(13), 8004. <https://doi.org/10.3390/su14138004>