T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

TÜRKİYE'DEKİ BAZI AKARSU HAVZALARINDA SU KALİTESİ VE KURAKLIK İLİŞKİLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜMEYSA DİKMEN

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ ÇAYAN ALKAN

BİLECİK, 2026

10843230

T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALİ ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BİYOSİSTEM MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

TÜRKİYE'DEKİ BAZI AKARSU HAVZALARINDA SU KALİTESİ VE KURAKLIK İLİŞKİLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜMEYSA DİKMEN

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ ÇAYAN ALKAN

BİLECİK, 2026

10843230

BEYAN

“Türkiye’deki Bazı Akarsu Havzalarındaki Su Kalitesi ve Kuraklık İlişkilerinin Belirlenmesi" adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazım aşamasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehberine uygun olarak tez/dönem projemi hazırladığımı, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel etik kurallarına uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, çalışmamın herhangi bir kısmının başka bir tez/dönem projesi olarak sunulmadığını, aksinin tespit edilmesi durumunda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Rümeysa Dikmen

../../20..

İmza:

	YAPAY ZEKÂ KULLANIMINA İLİŞKİN ÖĞRENCİ BEYAN FORMU	BŞEÜ-KAYSİS Belge	DFR-516
		İlk Yayın Tarihi/Sayısı	30.04.2026/16
		Revizyon Tarihi	00
		Revizyon No.su	00
		Toplam Sayfa	1

Bölüm I. Yapay Zekâ Kullanım Durumu

☒Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı araçlardan **faydalandım**.

☐Bu tezin/projenin yazım süreçlerinde yapay zekâ tabanlı herhangi bir araçtan **faydalanmadım**.

Bölüm II. Yapay Zekâ Kullanım Detayları

**Bu bölüm yalnızca yapay zekâ kullanımı beyan edilmiş ise doldurulacaktır. Aksi durumda boş bırakılmalıdır.*

Tezinizde/projenizde kullandığınız yapay zekâ araçlarını ve sürümünü listeleyiniz:

Yapay zekâ araçlarını tezimin/projemin aşağıdaki aşamalarında ilgili amaçlar için kullandım. (Birden fazla seçenek işaretlenebilir):

- ☐ Cümle oluşturma
- ☐ Literatür tarama
- ☐ Çeviri
- ☒ Düzenleme/dil kontrolü
- ☒ Veri işleme ve analizi
- ☒ Veri görselleştirme
- ☐ Görüntü üretme
- ☐ Kaynakça düzenleme
- ☐ Diğer (Belirtiniz):.....

Bu çalışmada yapay zekâ kullanımı ***Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Faaliyetlerinde Üretken Yapay Zekâ Kullanımına Dair Etik Rehber***'e ve akademik dürüstlük ilkelerine uygun şekilde gerçekleştirilmiş olup yapay zekâ araçlarından alınan destek, etik kurallar ve kaynak gösterme esaslarına uygun biçimde belirtilmiştir. Yapay zekâ kullanımı, çalışmanın özgünlüğüne, bilimsel etik kurallarına ve ilgili mevzuata aykırı olmayacak biçimde gerçekleştirilmiştir. Usulsüz yapay zekâ kullanımı (örneğin: kaynak göstermeksizin metin üretimi, otomatik içerik üretiminin özgün eser gibi sunulması, yanıltıcı kaynak gösterimi vb.) tarafımdan kesinlikle yapılmamıştır. Yapay zekâ araçlarının sağladığı bilgilerin doğruluğunu kontrol ettiğimi, yanlış veya eksik bilgi bulunması halinde tüm sorumluluğun tarafıma ait olduğunu; ayrıca çalışmamla ilgili bu beyana aykırı bir durumun herhangi bir zamanda tespit edilmesi durumunda ortaya çıkabilecek akademik ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi beyan ederim.

Rümeysa Dikmen

../../20..

ÖN SÖZ

Tez çalışmamın planlanması, yürütülmesi, değerlendirilmesi ve tamamlanması sürecinde bilgi, deneyim, değerli görüş ve önerileriyle bana her zaman yol gösteren, akademik gelişimime önemli katkılar sağlayan çok değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Çayan ALKAN 'a en içten teşekkür ve saygılarımı sunarım. Tez savunma sürecinde görüş ve katkılarıyla çalışmamın değerlendirilmesine katkı sağlayan Sayın Jüri Üyelerim Prof. Dr. Ramazan MERAL ve Doç. Dr. Saadet HACISALİHOĞLU'na teşekkür ve saygılarımı sunarım. Bu çalışmada kullanılan akım ve su kalitesi verilerinin temin edilmesini sağlayan Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ)'ne, lisans ve lisansüstü eğitimim boyunca bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım, yetişmemde emeği bulunan Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Ziraat ve Doğa Bilimleri Fakültesi Biyosistem Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, bu çalışmanın hazırlanması sürecinde görüş, öneri ve destekleriyle katkıda bulunan, adını burada tek tek sayamadığım tüm kişi ve kurumlara teşekkür ederim. Son olarak, hayatımın her döneminde sevgi, sabır ve fedakârlıklarıyla yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen kıymetli aileme sonsuz teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

ÖZET

Bu çalışmada, Türkiye'nin Meriç, Sakarya, Yeşilırmak, Susurluk ve Gediz havzalarında hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkilerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, söz konusu havzalarda yer alan sekiz istasyona ait uzun dönemli akım ve su kalitesi verileri analiz edilmiştir. Sulama suyu kalitesi, Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR), Sodyum Yüzdesi (%Na) ve Kanada Su Kalitesi İndeksi (CCME WQI) kullanılarak değerlendirilmiş, hidrolojik kuraklık ise Akım Kuraklık İndeksi (SDI) ile temsil edilmiştir. Verilerin istatistiksel analizinde Shapiro–Wilk normallik testi, Pearson ve Spearman korelasyon analizleri, Mann–Whitney U testi, Mevsimsel Mann–Kendall (SMK) trend analizi ve Sen Eğim (Sen's Slope) yöntemi uygulanmıştır. Normallik testi sonuçlarına göre SDI ve %Na değerleri altı, SAR değerleri ise beş istasyonda normal dağılım gösterirken, CCME WQI beş istasyonda normal dağılım varsayımını sağlamamıştır. Korelasyon analizleri ve Mann–Whitney U testi sonuçları, istasyonların büyük bölümünde SDI ile su kalitesi indeksleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmadığını ($p>0,05$), buna karşın belirli istasyonlarda yerel ölçekte anlamlı ilişkiler bulunduğunu göstermiştir ($p=0,03$). Ayrıca, Yeşilırmak Havzası'ndaki Durucasu ve Sütlüce istasyonlarında SDI ile CCME WQI arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar belirlenmiştir ($p<0,05$). Trend analizleri, özellikle Yeşilırmak Havzası'nda zamansal değişimlerin belirgin olduğunu ortaya koymuş, Sütlüce istasyonunda CCME WQI değerlerinde azalma eğilimi belirlenmiştir. Araştırma sonuçları, hidrolojik kuraklığın sulama suyu kalitesi üzerindeki etkilerinin karmaşık ve havzaya özgü olduğunu, bu ilişkilerin tek bir gösterge ile açıklanamayacağını ortaya koymuştur. Sonuç olarak, hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesinde çoklu su kalite indeksleri ile farklı istatistiksel analiz yöntemlerinin birlikte kullanılmasının daha kapsamlı ve güvenilir değerlendirmeler sağlayacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akarsu havzaları, CCME WQI, hidrolojik kuraklık, SDI, sulama suyu kalitesi

ABSTRACT

This study aimed to investigate the relationships between hydrological drought and irrigation water quality in the Meriç, Sakarya, Yeşilırmak, Susurluk, and Gediz basins of Türkiye. In this context, long-term streamflow and water quality data from eight monitoring stations located within these basins were analyzed. Irrigation water quality was assessed using the Sodium Adsorption Ratio (SAR), Sodium Percentage (Na%), and Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI), while hydrological drought was represented by the Streamflow Drought Index (SDI). The Shapiro–Wilk normality test, Pearson and Spearman distribution analyses, the Mann–Whitney U test, Seasonal Mann–Kendall (SMK) trend analysis, and the Sen's Slope method were employed in the analysis of the data. In contrast, CCME WQI did not satisfy the normality assumption at five stations. The results of the correlation analyses and Mann–Whitney U test indicated that there was no statistically significant relationship between SDI and the water quality indices at most stations ($p > 0.05$), whereas statistically significant relationships were identified at certain stations at the local scale ($p = 0.03$). In addition, statistically significant differences between SDI and CCME WQI were identified at the Durucasu and Sütlüce stations in the Yeşilırmak Basin ($p < 0.05$). Trend analyses revealed pronounced temporal changes, particularly in the Yeşilırmak Basin, and a decreasing trend was observed in CCME WQI values at the Sütlüce station. The results demonstrated that the effects of hydrological drought on irrigation water quality are complex and basin-specific and cannot be adequately explained by a single indicator. Consequently, the combined use of multiple water quality indices and different statistical analysis methods provides a more comprehensive and reliable assessment of the relationships between hydrological drought and irrigation water quality.

Keywords: River basins, CCME WQI, hydrological drought, SDI, irrigation water quality

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖN SÖZ i
ÖZET ii
ABSTRACT iii
İÇİNDEKİLER iv
TABLOLAR LİSTESİ vi
ŞEKİLLER LİSTESİ vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ vii
1. GİRİŞ 1
1.1. Su Kalitesi ve Tarımsal Sulama Açısından Önemi 1
1.2. Kuraklık ve Hidrolojik Kuraklık Kavramı 3
1.3. Araştırmanın Amacı, Önemi ve Özgün Değeri 6
1.4. Araştırma Hipotezleri 7
2. LİTERATÜR TARAMASI 8
2.1. Su Kalitesi ve Su Kalite İndekslerine Yönelik Çalışmalar 8
2.2. Hidrolojik Kuraklık ve Kuraklık İndekslerine Yönelik Çalışmalar 9
2.3. Kuraklık ve Su Kalitesi Arasındaki İlişkiyi İnceleyen Çalışmalar 11
2.4. Hidrolojik Kuraklık ve Su Kalitesi Alanında Trend Analizi Çalışmaları 14
3. MATERYAL VE YÖNTEM 18
3.1. Materyal 19
3.1.1. Çalışma alanı 20
3.1.1.1. Sakarya Havzası (Doğançay ve Yenice istasyonları) 20
3.1.1.2. Yeşilırmak Havzası (Durucasu HES ve Sütlüce istasyonları) 22
3.1.1.3. Gediz Havzası (Alaşehir Çayı Baklacı istasyonu) 24
3.1.1.4. Susurluk Havzası (Simav Çayı Yahyaköy istasyonu) 27
3.1.1.5. Meriç Havzası (Tunca Nehri Suakacağı istasyonu) 30
3.2. Yöntem 33
3.2.1. Su kalitesi ve kuraklık indekslerinin hesaplanması 34
3.2.1.1. Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR) 36
3.2.1.2. Sodyum Yüzdesi (%Na) 36
3.2.1.3. Kanada Su Kalite İndeksi (CCME WQI) 36
3.2.1.4. Akım Kuraklık İndeksi (SDI) 39

3.2.2. İstatistiksel analizler 41
3.2.2.1. Normallik testi 41
3.2.2.2. Korelasyon analizi 41
3.2.2.3. Mann-Whitney U testi 42
3.2.2.4. Mevsimsel Mann–Kendall (SMK) trend analizi 42
3.2.2.5. Sen Eğimi yöntemi (Sen's Slope) 43
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 45
4.1. Normallik Testi Sonuçları 51
4.2. Mann-Whitney U Testi Sonuçları 53
4.3. Korelasyon Analizi Sonuçları 56
4.4. Trend Analizi Sonuçları 65
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 70
KAYNAKÇA 74

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. CCME WQI hesaplamasında kullanılan parametreler, hedef değerler ve kaynaklar **35**
Tablo 3.2. Sodyum Yüzdesi (%Na) sınıflandırılması **36**
Tablo 3.3. CCME WQI yöntemi için su kalitesi değerleri ve kalite sınıfları **39**
Tablo 3.4. SDI değerlerinin sınıflandırılması **40**
Tablo 4.1. İzleme istasyonları genelinde su kalitesi ve kuraklık endekslerinin tanımlayıcı istatistikleri **45**
Tablo 4.2. İncelenen istasyonlara ait 1970–1999 dönemindeki aylık ortalama debi (Q) istatistikleri **47**
Tablo 4.3. Akarsu istasyonlarına ait su kalitesi indekslerinin Shapiro-Wilk normallik testi sonuçları **53**
Tablo 4.4. Farklı akarsu istasyonlarında SDI indeksi ile diğer indeksler arasındaki Mann Whitney U testi sonuçları **55**
Tablo 4.5. Farklı akarsu istasyonlarında SDI indeksi ile diğer indeksler arasındaki korelasyon analizi sonuçları **58**
Tablo 4.6. SDI ile su kalitesi indeksleri arasındaki doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modellerine ait belirleme katsayıları (R^2) **62**
Tablo 4.7. Seçilmiş istasyonlarda SDI ve CCME WQI serilerine ait Mevsimsel Mann–Kendall trend analizi sonuçları **66**

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Çalışmanın genel akış şeması **19**
Şekil 3.2. Çalışma alanı ve örnekleme istasyonlarının Türkiye'deki konumu **20**
Şekil 3.3. Sakarya Havzası'nın Türkiye'deki konumu **21**
Şekil 3.4. Yeşilırmak Havzası'nın Türkiye'deki konumu **23**
Şekil 3.5. Susurluk Havzası'nın Türkiye'deki konumu **27**
Şekil 3.6. Edirne hidrolojik durumu (DSİ, 2022) **31**
Şekil 4.1. İncelenen istasyonlarda 1970–1999 dönemine ait aylık ortalama debi (Q) değişimleri **48**
Şekil 4.2. Çalışma havzasındaki izleme istasyonlarında SAR, %Na ve CCME WQI değerlerinin kutu grafiği dağılımları **49**
Şekil 4.3. İncelenen istasyonlarda CCME WQI hesaplamasında kullanılan su kalitesi parametrelerinin dağılımı **50**
Şekil 4.4. (a) Yeşilırmak–Durucasu, (b) Yeşilırmak–Sütlüce ve (c) Sakarya–Yenice istasyonlarında SDI ile CCME WQI ve %Na arasındaki saçılım grafikleri **61**
Şekil 4.5. Yeşilırmak–Durucasu (a), Yeşilırmak–Sütlüce (b) ve Sakarya–Yenice (c) istasyonlarında SDI ile CCME WQI ve %Na arasındaki regresyon grafikleri **63**

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

%: Yüzde

%Na: Sodium Percentage (Sodyum Yüzdesi)

°C: Santigrat Derece

Ca: Kalsiyum

CCME WQI: Canadian Water Quality Index (Kanada Su Kalitesi İndeksi)

Cl^-: Klorür

DO: Dissolved Oxygen (Çözünmüş Oksijen)

DrinC: Drought Indices Calculator (Kuraklık İndeksleri Hesaplama Yazılımı)

DSİ: Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü

EC: Electrical Conductivity (Elektriksel İletkenlik)

EİE: Elektrik İşleri Etüt İdaresi

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations (Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü)

HES: Hidroelektrik Santrali

hm^3: Hektometreküp

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli)

K: Potasyum

km: Kilometre

km^2: Kilometrekare

L: Litre

m: Metre

m^3: Metreküp

m^3/s: Metreküp/saniye

meq L^{-1}: Miliekivalan/Litre

Mg: Magnezyum

mg/L: Miligram/Litre

mm: Milimetre

Na: Sodyum

ORSAM: Ortadoğu Stratejik Araştırmalar Merkezi

OSİB: Orman ve Su İşleri Bakanlığı

P: Fosfor

pH: Potential of Hydrogen (Potansiyel Hidrojen)

PO_4^{3-}: Fosfat

QGIS: Quantum Geographic Information System (Coğrafi Bilgi Sistemi Yazılımı)

r: Pearson Korelasyon Katsayısı

ρ: Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı

SAR: Sodium Adsorption Ratio (Sodyum Adsorpsiyon Oranı)

SDI: Streamflow Drought Index (Akım Kuraklık İndeksi)

SPEI: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi)

SPI: Standardized Precipitation Index (Standartlaştırılmış Yağış İndeksi)

SYGM: Su Yönetimi Genel Müdürlüğü

TÜBİTAK MAM: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi

µS/cm: Mikrosiemens/Santimetre

1. GİRİŞ

1.1. Su Kalitesi ve Tarımsal Sulama Açısından Önemi

Türkiye, yarı kurak iklim kuşağında yer alması nedeniyle su kaynakları açısından hassas bir yapıya sahiptir. Türkiye'de yıllık ortalama yağış yaklaşık 574 mm olup, bu değer yaklaşık 450 milyar m³'lük yıllık su potansiyeline karşılık gelmektedir. Ancak mevcut teknik ve ekonomik koşullar altında kullanılabilir yerüstü ve yeraltı suyu potansiyeli yıllık yaklaşık 112 milyar m³ ile sınırlıdır ve bu miktarın önemli bir bölümü hâlihazırda kullanılmaktadır (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü [DSİ], 2019). Artan nüfus, tarımsal faaliyetler ve iklim değişikliğinin etkileri su kaynakları üzerindeki baskıyı giderek artırmakta; bu durum suyun yalnızca miktarının değil, aynı zamanda kalitesinin de sürdürülebilir su kaynakları yönetiminde kritik bir unsur hâline gelmesine neden olmaktadır (Şen, 2015).

Türkiye'nin üç tarafının denizlerle çevrili olmasına rağmen su stresi yaşayan ülkeler arasında yer alması, su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini zorunlu kılmaktadır (Hakyemez, 2019). Özellikle tarım sektörü, toplam su kullanımının en büyük payına sahip olup, kuraklık koşullarında suya olan talebin artması, mevcut su kaynaklarının hem nicelik hem de nitelik açısından daha dikkatli değerlendirilmesini gerektirmektedir. Kurak dönemlerde azalan akımlar ve seyreltme kapasitesi, tarımsal sulamada kullanılan yüzey sularında su kalitesinin bozulmasına neden olabilmektedir (Qiu vd., 2023).

Kuraklık dönemlerinde akarsu debilerinin azalması, suyun doğal seyreltme kapasitesini düşürmekte ve çözünmüş iyonlar ile minerallerin konsantrasyonunu artırmaktadır. Bu durum özellikle elektriksel iletkenlik (EC), tuzluluk ve sodyum tehlikesinde artışa neden olarak sulama suyu kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Bununla birlikte, kuraklığın su kalitesi üzerindeki etkileri doğrusal olmayıp havzaların hidrolojik, jeolojik ve çevresel özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir.

Artan nüfus, kentleşme, sanayileşme ve tarımsal üretim faaliyetlerindeki artış, su kaynaklarına olan talebi sürekli artırmaktadır. Özellikle tarım sektörü, küresel ölçekte su tüketiminin en büyük payını oluşturmakta olup, 2050 yılına kadar tarımsal su talebinin önemli ölçüde artacağı öngörülmektedir (Faures vd., 2007). İklim değişikliği, hızlı kentleşme, artan gıda talebi ve doğal kaynakların sürdürülebilir olmayan kullanımı nedeniyle dünya nüfusunun yaklaşık %40'ı su kıtlığı riskiyle karşı karşıyadır (Calzadilla vd., 2011). Buna ek olarak iklim

değişikliği; yağış rejimlerini, sıcaklıkları ve buharlaşma-terleme süreçlerini değiştirerek hidrolojik döngüyü önemli ölçüde etkilemekte ve hidrolojik kuraklıkların daha sık ve daha şiddetli yaşanmasına neden olmaktadır. Günümüzde küresel su kullanımının yaklaşık %70'i tarımsal sulamada, %22'si endüstride ve %8'i içme-kullanma amacıyla gerçekleştirilmektedir. Türkiye'de de su kaynaklarının sınırlı olması ve mevcut su kullanım yapısı dikkate alındığında, suyun miktarı kadar kalitesinin de sürdürülebilir ve planlı bir şekilde yönetilmesi büyük önem taşımaktadır.

Su ihtiyacı önem sırasına göre gruplara ayrıldığında tarımsal su ihtiyacı 3. sırada yer almaktadır. Tarımda sürdürülebilirlik sadece suyun miktarına bağlı değildir; aynı zamanda suyun etkin ve verimli kullanımı kadar, kalitesi de kritik bir rol oynar. Kullanılan suyun sulama suyu kriterlerine uygun olması ve insan sağlığını tehdit edecek kirleticileri içermemesi büyük önem taşır. Aksi takdirde, kirlilik hem toprağın verimliliğini düşürerek gıda güvenliğini tehdit edebilir hem de üretilen ürünler aracılığıyla insan sağlığına zarar verebilir. Bu nedenle, sürdürülebilir tarım uygulamaları, su kaynaklarının miktarını korumanın yanı sıra kalitesini de güvence altına almayı hedefler , (Bayraktar ve Küçükbayrak, 2025; Orman ve Su İşleri Bakanlığı, 2017; Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022).

Su kalitesi, bir su kaynağının belirli kullanım amaçlarına uygunluğunu belirleyen fiziksel, kimyasal ve biyolojik parametrelerin bütünüdür. Ancak bu parametrelerin farklı birimlerde ölçülmesi ve çok sayıda değişken içermesi, su kalitesinin bütüncül olarak değerlendirilmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenle geliştirilen su kalitesi indeksleri, çok sayıda parametreyi tek bir sayısal değer altında toplayarak su kalitesinin daha anlaşılır ve karşılaştırılabilir biçimde değerlendirilmesine olanak tanımaktadır (Hepsağ, 2003; Uddin vd., 2021). Su kalite indeksleri, su kalitesinin “iyi”, “orta” veya “kötü” gibi sınıflamalarla ifade edilmesini sağlayarak karar vericiler için önemli bir değerlendirme aracı sunmaktadır (Dede ve Sezer, 2017).

Nehir suyu kalitesi, hem doğal süreçlerden hem de kentleşme, endüstriyel faaliyetler ve tarım gibi insan kaynaklı baskılardan etkilenir. Bunlar arasında, tarımsal uygulamalar yaygın kirliliğin önemli bir kaynağıdır, çünkü gübreler ve pestisitler besin konsantrasyonlarını ve ötrofikasyon riskini artırabilir. Bu nedenle, su kalitesi ekosistem sürdürülebilirliği çerçevesinde değerlendirilmelidir.

Su kalitesi indeksleri, birden fazla parametreyi tek bir değerde birleştirerek bütünleyici bir yaklaşım sunar ve yorumlamayı kolaylaştırır. Tarımsal sulamada genellikle sodyum adsorpsiyon oranı (SAR) ve sodyum yüzdesi (%Na) gibi parametreler kullanılır, ancak bileşik indeksler daha kapsamlı bir değerlendirme sunarak karmaşık çevresel süreçleri basitleştirebilir. Kanada Su Kalitesi İndeksi (CCME WQI), esnek yapısı ve farklı kullanım amaçlarına uyarlanabilirliği nedeniyle literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (CCME, 2001). CCME WQI'nin tarımsal sulama açısından kullanımı, suyun iyonik bileşimi ile sınır değer aşım sıklıklarını birlikte değerlendirmesi bakımından önemli avantajlar sunmaktadır (Bilgin, 2018; Şahin, 2018).

SAR ve %Na, sulama suyundaki sodyum tehlikesini değerlendiren temel indekslerdir. Yüksek sodyum konsantrasyonu toprak yapısını olumsuz etkileyerek geçirgenlik ve havalanmayı azaltabilmektedir. Bunun yanında elektriksel iletkenlik (EC) toplam tuzluluğun, klorür (Cl^-) ise özellikle duyarlı bitkiler açısından toksisite riskinin önemli göstergelerindendir. Çözünmüş oksijen (DO) ise sucul ekosistemin kimyasal dengesinin korunmasında kritik rol oynamaktadır. Bu nedenle söz konusu parametrelerin birlikte değerlendirilmesi, farklı hidrolojik koşullar altında sulama suyu kalitesinin daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Kanada Su Kalitesi İndeksi (CCME WQI), yalnızca farklı su kalite parametrelerini tek bir sayısal değer altında birleştirmesi nedeniyle değil, aynı zamanda parametrelerin sınır değerleri aşma kapsamını (Scope), aşım sıklığını (Frequency) ve aşım büyüklüğünü (Amplitude) birlikte değerlendirmesi nedeniyle de literatürde yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu çok boyutlu değerlendirme yaklaşımı, farklı ölçüm birimlerine sahip fizikokimyasal parametrelerin tek bir indeks altında bütüncül olarak yorumlanmasına olanak sağlamaktadır. Özellikle hidrolojik kuraklık gibi çok sayıda çevresel sürecin su kalitesini aynı anda etkilediği durumlarda, CCME WQI'nin tek parametreli değerlendirmelere göre daha kapsamlı sonuçlar sunduğu belirtilmektedir (CCME, 2001; Neary vd., 2001; Tyagi vd., 2013).

1.2. Kuraklık ve Hidrolojik Kuraklık Kavramı

Kuraklık, yağışın bir bölgede uzun yıllar ortalamanın altında düşmesi sonucu bölgedeki çevresel, ekonomik ve sosyal sorunlara neden olan bir doğal afettir. Kuraklık yağış eksikliği sonucu olarak ortaya çıkması ile yaşamın kaynağı olan suyun ve su kaynaklarının bulunduğu

bölgede azalmasına sebep olmakta ve buna bağlı olarak bölgenin iklim yapısına uygun yapılan tarım veriminin etkilenmesi mümkündür.

Bölgeden bölgeye kuraklık ölçümlerini karşılaştırmak ve geçmiş kuraklık olaylarını değerlendirmek için bazı sayısal standartlara ihtiyaç vardır. Bununla birlikte, kuraklığın tanımı konusunda var olan farklılıklar, kuraklığın özellikleri ve etkili olduğu geniş sektör yelpazesi evrensel bir kuraklık indeksi oluşturmayı zorlaştırmaktadır. Kuraklığın karmaşıklığı nedeniyle, kuraklık koşullarının şiddetini tanımlamak, izlemek ve ölçmek için tek tip bir yöntem mevcut değildir. Çok sayıda kuraklık indeksi mevcuttur (Heim, 2002; Quiring, 2009).

Kuraklık göstergeleri ve indeksleri, kuraklığın şiddetini, süresini ve mekânsal yayılımını tanımlamak amacıyla kullanılan ölçütlerdir. Kuraklık izleme çalışmalarında bu iki kavram çoğu zaman birbirinin yerine kullanılmakla birlikte, göstergeler daha geniş bir çerçevede ele alınmaktadır. Bu kapsamda kuraklık göstergeleri; yağış, sıcaklık, akarsu akımı, yeraltı suyu seviyeleri, rezervuar doluluk oranları, kar örtüsü ve toprak nemi gibi farklı hidrolojik ve meteorolojik parametreleri içermektedir. Bu parametreler, kuraklık koşullarının izlenmesi ve değerlendirilmesinde temel veri kaynaklarını oluşturmaktadır.

Kuraklık indekslerinden beklenen başlıca yarar, her coğrafi birimdeki (bölge, bölüm, yöre, havza, vb.) tarihsel kayıtlarda yer alan meteorolojik, tarımsal ya da hidrolojik kuraklık dönemlerinin doğru bir biçimde nitelendirilmesini sağlamasıdır. Doğru bir kuraklık nitelendirmesi, karar vericileri, tarihsel iklim değişikliği ve onun bir coğrafi alan üzerindeki etkilerinin ortaya konulması açısından nesnel bir ölçüt ortaya koyar (Türkeş ve Tatlı, 2010).

Kuraklık; meteorolojik, hidrolojik, tarımsal ve sosyo-ekonomik boyutları bulunan karmaşık bir olgudur (Wilhite ve Glantz, 1985). Meteorolojik kuraklık doğrudan yağışlardaki azalma ile ilişkilendirilirken, yağışlardaki azalmanın su kaynakları üzerindeki etkileri çoğu zaman belirli bir gecikmeyle ortaya çıkmaktadır. Bu gecikmeli etki, hidrolojik kuraklığın değerlendirilmesinin önemini artırmaktadır (Mishra ve Singh, 2010).

Hidrolojik kuraklık, hidrolojik sistemdeki su eksikliği anlamına gelir. Hidrolojik kuraklığın sıklığı ve şiddeti, genellikle nehir havzası ölçeğinde tanımlanmaktadır. Hidrolojik kuraklık; akarsu debileri, göl seviyeleri ve yeraltı suyu rezervlerinde uzun dönem ortalamaların altına düşülmesiyle karakterize edilmekte ve özellikle tarımsal sulama açısından doğrudan sonuçlar doğurmaktadır (Zargar vd., 2011). Hidrolojik kuraklığın güvenilir biçimde değerlendirilmesi, su yönetimi açısından önem taşımaktadır. Bu kapsamda, doğrudan akım

verilerine dayanan Akım Kuraklık İndeksi (Streamflow Drought Index – SDI), hidrolojik kuraklığı niceliksel olarak ortaya koymada öne çıkmaktadır (Gümüş, 2017; Nalbantis, 2008). Hidrolojik kuraklık genellikle akım verilerine dayalı indeksler ile değerlendirilmektedir. Bu kapsamda, farklı zaman ölçeklerinde hesaplanabilen Akım Kuraklık İndeksi (Streamflow Drought Index – SDI), hem kısa hem de uzun dönemli kuraklık koşullarının analizlerini sağlayan güvenilir bir yöntemdir (Nalbantis, 2008).

Türkiye ve diğer yarı kurak bölgelerde yapılan önceki çalışmalar, SAR, %Na ve EC gibi sulama suyu kalitesi parametrelerinin genellikle düşük sodyum tehlikesini gösterdiğini, ancak düşük akım ve kuraklık koşullarında tuzluluk seviyelerinin yükselebileceğini göstermiştir. Uluslararası çalışmalarda da benzer örüntüler bildirilmiş olup, sodyumla ilgili indekslerin genellikle kabul edilebilir sınırlar içinde kaldığı, tuzluluk göstergelerinin ise kuraklığa daha duyarlı olduğu öne sürülmüştür.

Bu çerçevede, kuraklığın yalnızca su miktarı üzerindeki etkilerinin değil, aynı zamanda tarımsal sulama açısından su kalitesi üzerindeki etkilerinin de niceliksel olarak ortaya konulması gerekmektedir. Literatürde kuraklık çalışmaları çoğunlukla su miktarına, su kalitesi çalışmaları ise belirli dönemlere ait kimyasal parametrelere odaklanmış; bu iki bileşenin birlikte değerlendirildiği çalışmalar ise sınırlı kalmıştır. Ancak kuraklık dönemlerinde azalan akımlar ve değişen hidrolojik koşullar, tarımsal sulama suyu kalitesinde ölçülebilir değişimlere yol açabilmektedir (Jo vd., 2024; Qiu vd., 2023).

Son yıllarda yapılan çalışmalar, hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin doğrusal olmadığını ve havzaların hidrolojik, jeolojik ve çevresel özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebildiğini ortaya koymaktadır (Gao vd., 2016; Jo vd., 2024; Mosley, 2015; Qiu vd., 2023). Bu durum, kuraklık–su kalitesi etkileşimlerinin tek bir parametre ile açıklanamayacağını ve bu ilişkinin değerlendirilmesinde çok parametreli, bütüncül yaklaşımlara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir.

Bu çalışma, Türkiye'de seçilen akarsu havzalarında hidrolojik kuraklık ile tarımsal sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkiyi incelemeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda, hidrolojik kuraklık SDI yöntemi ile; su kalitesi ise SAR, %Na ve Kanada Su Kalitesi İndeksi (CCME WQI) kullanılarak değerlendirilmektedir. Elde edilen veriler normallik testleri, parametrik olmayan karşılaştırmalar ve korelasyon analizleri ile desteklenmekte olup, çalışmanın

özgünlüğü hidrolojik kuraklık ile tek parametreli ve çok parametreli su kalitesi indekslerinin çok havzalı ve entegre bir yaklaşımla birlikte değerlendirilmesinden kaynaklanmaktadır.

1.3. Araştırmanın Amacı, Önemi ve Özgün Değeri

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin farklı hidrolojik özelliklere sahip seçilmiş akarsu havzalarında tarımsal sulama suyu kalitesi ile hidrolojik kuraklık arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak değerlendirilmesidir. Bu kapsamda, akarsuların sulamaya uygunluğu Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR), Sodyum Yüzdesi (%Na) ve Kanada Su Kalitesi İndeksi (CCME WQI) kullanılarak değerlendirilmiş; hidrolojik kuraklık ise Akım Kuraklık İndeksi (Streamflow Drought Index–SDI) yöntemiyle belirlenmiştir. Hidrolojik kuraklığın değerlendirilmesinde, güncel hidrolojik koşulların doğrudan temsil edilmesinden ziyade, geçmiş döneme ait uzun süreli akım kayıtlarından yararlanılarak doğal hidrolojik değişkenliği temsil eden bir referans dönem oluşturulması amaçlanmıştır. Bu yaklaşım ile günümüzde artan baraj yapımı, yoğun sulama faaliyetleri ve akım rejimindeki diğer değişimlerin referans dönem üzerindeki etkisinin mümkün olduğunca azaltılması ve kuraklık koşullarının daha uygun bir hidrolojik temel üzerinden değerlendirilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişki korelasyon analizleri, parametrik olmayan istatistiksel testler, regresyon analizleri ve trend analizleri ile niceliksel olarak incelenmiştir.

Bu genel amaç doğrultusunda aşağıdaki spesifik hedefler belirlenmiştir:

- İncelenen akarsuların tarımsal sulamaya uygunluğunu SAR, %Na ve CCME WQI kullanarak değerlendirmek ve sınıflandırmak.
- Uzun dönem akım verileri kullanılarak SDI yöntemi ile hidrolojik kuraklığın şiddeti, süresi ve frekansını belirlemek.
- Hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalite göstergeleri arasındaki istatistiksel ilişkileri uygun analiz yöntemleri kullanarak ortaya koymak.
- Hidrolojik kuraklık ve su kalitesi göstergelerindeki zamansal eğilimleri Mevsimsel Mann–Kendall (SMK) testi ve Sen Eğimi yöntemi ile değerlendirmek.

Bu çalışma, hidrolojik kuraklık ile tarımsal sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin yalnızca tek bir havzada değil, farklı hidrolojik ve çevresel özelliklere sahip Meriç, Sakarya, Yeşilırmak, Susurluk ve Gediz havzalarında aynı yöntemlerle karşılaştırmalı olarak

incelenmesi bakımından önem taşımaktadır. Elde edilen bulguların, kuraklık dönemlerinde sulama suyu kalitesinde meydana gelebilecek değişimlerin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayarak sürdürülebilir su kaynakları yönetimi ve tarımsal planlama çalışmalarına bilimsel altyapı oluşturması beklenmektedir.

Literatürde hidrolojik kuraklık ve su kalitesini birlikte ele alan çalışmalar bulunmasına rağmen, SDI ile temsil edilen hidrolojik kuraklığın SAR, %Na ve CCME WQI ile çok havzalı olarak değerlendirildiği çalışmalar sınırlıdır. Bu çalışmanın özgünlüğü; kuraklık ve sulama suyu kalitesini aynı çerçevede ele alarak korelasyon, parametrik olmayan testler, regresyon ve trend analizleriyle çok yönlü değerlendirmesi ve farklı havzaları karşılaştırmasıdır. Çalışma, hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin havzaya göre değişimini ortaya koyarak literatüre katkı sağlamaktadır.

1.4. Araştırma Hipotezleri

Bu çalışmada, hidrolojik kuraklık ile tarımsal sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin istatistiksel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Kuraklık dönemlerinde akarsu akımlarının azalması, suyun seyreltme kapasitesini etkileyerek bazı havzalarda su kalitesinde değişikliklere neden olabilmektedir. Ancak bu etkinin yönü ve büyüklüğü, havzaların hidrolojik, jeolojik ve çevresel özelliklerine bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle çalışmada aşağıdaki hipotezler test edilmiştir:

H_0 (Sıfır Hipotezi): İncelenen istasyonlarda Akım Kuraklık İndeksi (SDI) ile tarımsal sulama suyu kalite göstergeleri (SAR, %Na ve CCME WQI) arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmamaktadır.

H_1 (Alternatif Hipotez): İncelenen istasyonlardan en az birinde Akım Kuraklık İndeksi (SDI) ile tarımsal sulama suyu kalite göstergelerinden (SAR, %Na veya CCME WQI) en az biri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmaktadır.

Bu hipotezler, hidrolojik kuraklık ile tarımsal sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin istasyon bazında değerlendirilmesine yönelik oluşturulmuştur. Hipotezlerin test edilmesinde kullanılan istatistiksel analiz yöntemleri Materyal ve Metot bölümünde ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Su Kalitesi ve Su Kalite İndekslerine Yönelik Çalışmalar

Evsel ve endüstriyel atık suların yeterli arıtım yapılmadan alıcı ortama verilmesi, akarsularda organik madde ve kirletici yükünü artırarak doğal öz arıtma süreçlerinin etkinliğini azaltmaktadır. Akarsuların sınırlı taşıma kapasitesi, bu kirleticilerin mansap alanlara taşınmasına ve göl ile deniz ekosistemlerinde ikincil kirlilik sorunlarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Literatürde bu süreç, akarsu kirliliğinin doğrusal olmayan ve kümülatif bir karaktere sahip olduğunun önemli bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir (Gündoğdu ve Turhan, 2004; Kurtulmuş, 2006).

Meriç Nehri bölgesinde ise pestisit kalıntılarının su kalitesini olumsuz etkilediği ve ekosistem üzerinde baskı yarattığı belirtilmektedir (Karakaya vd., 2018). Tarım kaynaklı yüzey akışları, Meriç Nehri'nde bulanıklık, askıda katı madde, fosfat seviyeleri ve ötrofikasyon riskini artırmaktadır. Özellikle yağışlı dönemlerde tarımsal drenaj suyu taşıyan kanallar aracılığıyla kirleticilerin nehre doğrudan taşındığı belirlenmiştir (Yıldız vd., 2016).

Tarımsal faaliyetler, özellikle yayılı kirlilik karakteri nedeniyle akarsu su kalitesini etkileyen en karmaşık baskı unsurlarından biri olarak öne çıkmaktadır. Tarımsal üretimde kullanılan gübre ve pestisitler, hidrometeorolojik koşullara bağlı olarak su ortamlarına taşınmakta; bu durum, besin tuzu konsantrasyonlarında artış ve ötrofikasyon riskinin yükselmesiyle sonuçlanmaktadır. Literatürde, bu sürecin yalnızca su kalitesi parametrelerini değil, aynı zamanda sucul ekosistemlerin yapısal ve işlevsel bütünlüğünü de etkilediği belirtilmektedir (Schwarzenbach vd., 2010; Taşkaya, 2004). Bu bağlamda, tarımsal üretim–su kalitesi ilişkisi, yalnızca kirlilik düzeyi üzerinden değil, ekosistem dayanıklılığı perspektifinden de ele alınmaktadır.

Su kalitesinin değerlendirilmesinde geleneksel yaklaşımlar, parametrelerin tek tek ele alınmasına dayandığından bütüncül bir yorum yapılmasını güçleştirmektedir. Bu gereksinim doğrultusunda geliştirilen Su Kalitesi İndeksleri, çok sayıda parametreyi tek bir sayısal değer altında toplayarak karar vericiler için daha anlaşılır bir çerçeve sunmaktadır (Horton, 1965). Bununla birlikte literatürde, bu indekslerin sağladığı basitleştirmenin, bazı durumlarda çevresel karmaşıklığı maskeleyebildiği ve özellikle kullanım amacına özgü değerlendirmelerde destekleyici analizlerle birlikte ele alınmasının gerekli olduğu vurgulanmaktadır (Abbasi, 2012; Bilgin, 2018; Brown vd., 1970).

2.2. Hidrolojik Kuraklık ve Kuraklık İndekslerine Yönelik Çalışmalar

Alkan (2021), İklim değişikliğinin kuraklığa ve buğday verimine etkisinin belirlenmesi başlıklı tezinde Porsuk Çayı havzasında yaptığı çalışmada havzanın genel itibariyle kurak özellik gösterdiğini belirlemiştir. Geçmişteki analizlerinde hidrolojik ve tarımsal kuraklığın yaygın olduğu tespit edilmiştir. Gelecek iklim senaryolarına göre ise havzanın meteorolojik açıdan kuraklaşacağı, hidrolojik kuraklığın ise artış potansiyeli göstermekle birlikte belirli dönemlerde normal koşulların devam edebileceği ifade edilmiştir.

Özfidaner vd. (2018), Seyhan havzasında ölçülmüş olan aylık ortalama akımlar kullanılarak Akım Kuraklık İndeksi metoduna göre kuraklığın saptanması hedeflenmiş ve Seyhan Havzası üzerinde bulunan 1801 ve 1818 nolu akım gözlem istasyonlarına ait 1967 - 2007 yılları arası aylık toplam akım verileri kullanılmıştır. SDI metoduna göre 3, 6, 9,12 aylık dönemlerde kuraklık şiddetini ifade eden indis değerleri elde edilmiş ve her iki istasyonda da 9-12 aylık referans dönemleri için SDI değerlerinde benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Kumanlıoğlu ve Fıstıkoğlu (2019), Yukarı Gediz Havzası'nda 1960-2017 yılları arasında kuraklık incelemelerinde bulunmuşlardır. Kış mevsimindeki kuraklıkların yaşanan yıllık kuraklıklar üzerinde önemli olduğunu belirlemişlerdir. Son yıllarda kuraklık süresi ve kuraklık şiddetinde artış olduğunu tespit etmişlerdir .

Taylan ve Toker (2023), Uşak ili ve çevresinde yer alan akım gözlem istasyonlarının 1986- 2015 yılları arasındaki verilerinden faydalanılarak SDI metodu ile hidrolojik kuraklık analizleri yapılmıştır. İstasyonların hidrolojik kuraklık sınıfında hafif nemli ve hafif kurak sınıfları daha çok belirlenmiştir. Kurak yıl miktarları nemli yıl miktarlarından daha az tespit edilmiştir .

Kale ve Duman (2024), Van Gölü Kapalı Havzası'nda Bendimahi Çayı'ndaki hidrolojik kuraklık araştırmalarını SDI metodu ile yapmışlardır. 19 su yılında faklı kuraklık sınıflarında hidrolojik kuraklık gerçekleştiği tespit edilmiştir. Yağış ve akım değerleri birlikte değerlendirildiğinde ortalama yağışın üzerinde olan mart ve nisan aylarında akarsu akımına direkt etkisi olduğu görülmüştür .

Çetin ve Kumanlıoğlu (2023), Gediz havzasında SPI, SPEI ve SDI yöntemleri ile meteorolojik ve hidrolojik kuraklık analizleri yapmışlardır. Meteorolojik kuraklıkların

etkisinin havza akımlarına etkisi tespit edilmiştir. Meteorolojik kuraklık olaylarının, akım miktarlarını önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir.

Gümüş (2017), Yapılan bu çalışmada; Türkiye'nin güneyinde yer alan ve sınır aşan sular kapsamına giren Asi havzasında bulunan dört akım gözlem istasyonuna ait 52 yıllık (1954-2005) akım verileri, Akım Kuraklık İndeksi kullanılarak havzanın hidrolojik kuraklık analizi yapılmıştır. Analizde aylık akım verileri kullanılarak 3, 6 ve 12 aylık SDI değerleri ile Asi havzasının kurak ve nemli dönemlerinin şiddeti, büyüklüğü ve dağılımı belirlenmiş ve analiz sonucunda, tüm zaman ölçekleri için ele alınan istasyonların ortalama SDI değerlerine göre 1980- 2005 arasındaki kurak geçen yıl sayısının, 1954-1979 yılları arasındaki kurak geçen yıl sayısından daha çok olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca havza bazında aşırı kurak yılların 2000 ve 2001 yılları olduğu da belirlenmiştir.

Nalbantis ve Tsakiris (2009), hidrolojik kuraklığın belirlenmesinde kullanılan mevcut indekslerin veri ve hesaplama açısından karmaşık olduğunu belirtmiş, meteorolojik kuraklıkta yaygın olarak kullanılan Standartlaştırılmış Yağış İndeksi'ne (SPI) benzer şekilde Akım Kuraklık İndeksi'ni (SDI) önermiştir. SDI, hidrolojik yıl içerisinde 3, 6, 9 ve 12 aylık kümülatif akım verilerine dayanmaktadır. Geliştirilen yöntem özellikle akım verisi sınırlı olan havzalarda uygulanabilir olduğu ortaya konmuştur.

Son yıllarda yapılan çalışmalar, hidrolojik kuraklığın yalnızca akarsu debilerini azaltmakla kalmadığını, aynı zamanda su kalitesi üzerinde de doğrusal olmayan etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Özellikle iklim değişikliğine bağlı hidrolojik uç olayların artmasıyla birlikte, kuraklık analizlerinde farklı zaman ölçeklerini değerlendirebilen SDI gibi akım temelli indekslerin kullanımının önem kazandığı bildirilmektedir. Bu yaklaşım, kuraklığın havza ölçeğinde zamansal değişiminin daha güvenilir biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır (Schafer vd., 2021; Van Vliet vd., 2023).

Gümüş ve Algın (2017) Türkiye'deki Seyhan-Ceyhan Nehri Havzaları için hem meteorolojik hem de hidrolojik kuraklık analizlerini yapmışlardır. Standart Yağış İndeksi (SPI) ve Akım Kuraklık İndeksi (SDI) yöntemleri kullanılmıştır. Bu bölge için kuraklık olaylarının yeri ve oluşum seviyesi grafiksel olarak belirtilmiş ve sunulmuştur.

Aksoy vd. (2018), yaptıkları çalışmada Gediz Havzası'nda bulunan ve en az 10 yıllık ölçümü bulunan 35 istasyonun 1960 – 2016 yılları arasındaki verilerini kullanarak SPI yöntemi ile kuraklık analizi yapmışlardır. Çalışma sonucunda 1, 3, 6, 12, 24 ve 48 aylık periyotlar için

SPI değerlerini belirlemişlerdir. Havzadaki tüm periyotlar için zamanın %32'sinde hafif kuraklık, %8,8'inde orta şiddette kuraklık, %5'inde şiddetli kuraklık ve %2,3'ünde çok şiddetli kuraklık görüldüğünü ortaya koymuşlardır.

Tabari vd. (2012), 1975–2009 yılları arasındaki dönemde İran'ın kuzeybatısındaki 14 akım gözlem istasyonunun verileriyle istasyonda 3, 6, 9 ve 12 aylık dönemler için Akım Kuraklık İndeksi (SDI) yöntemi kullanılarak söz konusu yerin hidrolojik kuraklık analizi yapılmıştır. Aşırı kurak dönemlerin 12 aylık değerlendirilmesinde 1997-1998 ve 2008-2009 dönemlerinde meydana geldiği belirlenmiştir.

Yağış eksikliğinin akarsu akımları ve rezervuar depolamaları üzerindeki etkisi gecikmeli olarak ortaya çıktığından, hidrolojik göstergeler kuraklığın ilk işaretleri arasında yer almaz. Bu nedenle meteorolojik kuraklık sona erdikten sonra bile hidrolojik kuraklık uzun süre varlığını sürdürebilir (Linsley vd., 1958).

Xingiun Hong vd. (2015) Bu çalışmada hidrolojik kuraklık indisi olan SDI'nin 12 aylık zaman aralığını kullanarak Çin'in Yangtze Nehri Havzası'nda (1882-2009 yılları arasında) analiz yaparak araştırmacılar modelin kuraklıkların tahmininde başarılı olduğunu belirtmişlerdir.

2.3. Kuraklık ve Su Kalitesi Arasındaki İlişkiyi İnceleyen Çalışmalar

İklim değişikliği, küresel ölçekte sıcaklık artışları, yağış rejimlerindeki düzensizlikler ve artan potansiyel evapotranspirasyon yoluyla hidrolojik döngüyü doğrudan etkilemekte; bu süreç hidrolojik kuraklıkların sıklık, süre ve şiddetinde belirgin artışlara neden olmaktadır. Literatürde, iklim değişikliğine bağlı kuraklık baskısının yalnızca su miktarındaki azalmayla sınırlı kalmadığı, aynı zamanda su kalitesi üzerinde dolaylı fakat yapısal etkiler oluşturduğu giderek daha güçlü biçimde vurgulanmaktadır. Akarsu debilerinin azaldığı dönemlerde seyreltme kapasitesinin düşmesi, çözünmüş madde, iyon ve besin tuzu konsantrasyonlarında artışlara yol açmakta; bu durum, tarımsal sulama açısından kritik olan tuzluluk ve sodyum tehlikesinin özellikle kurak dönemlerde daha görünür hâle gelmesine neden olmaktadır (Gao vd., 2016; IPCC, 2021; Nalbantis ve Tsakiris, 2009). Bu bulgular, kuraklık–su kalitesi ilişkisinin zamansal olarak sabit bir yapı göstermediğini, aksine belirli hidrolojik eşiklerin aşılmasıyla daha belirgin hâle geldiğini ortaya koymaktadır.

Akarsular, hidrolik, kimyasal ve biyolojik süreçlerin sürekli etkileşim hâlinde olduğu dinamik sistemlerdir ve bu nedenle çevresel baskılara karşı yüksek hassasiyet göstermektedir. Havza ölçeğinde meydana gelen doğal süreçler ile antropojenik faaliyetler, akarsuların fiziksel ve kimyasal özelliklerini birlikte şekillendirmekte; bu etkileşim, su kalitesinin tekil kirletici girdilerden ziyade havza bütünündeki arazi kullanımı ve yönetim pratikleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Ulusal ve uluslararası literatürde, hızlı nüfus artışı, plansız kentleşme, sanayileşme ve yoğun tarımsal faaliyetlerin akarsu su kalitesi üzerinde baskı oluşturduğu ve bu baskının özellikle yarı kurak havzalarda daha karmaşık ve çok boyutlu sonuçlar doğurduğu bildirilmektedir (Kalyoncu vd., 2005; Vörösmarty vd., 2010). Bu durum, su kalitesi sorunlarının yalnızca kirlenme düzeyleriyle değil, havza ölçeğinde biriken baskıların bileşkesiyle değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir.

Tarımsal sulama açısından su kalitesinin değerlendirilmesinde, tuzluluk ve sodyum kaynaklı riskler öne çıkmaktadır. Bu kapsamda elektriksel iletkenlik (EC), Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR) ve sodyum yüzdesi (%Na), sulama suyunun toprak yapısı ve bitki gelişimi üzerindeki potansiyel etkilerini yansıtan temel göstergeler olarak kabul edilmektedir. Literatürde, SAR ve %Na değerlerinin çoğu havzada nispeten istikrarlı seyrettiği; buna karşın EC parametresinin hidrolojik koşullara daha duyarlı olduğu ve özellikle düşük akım dönemlerinde hızlı artışlar gösterebildiği belirtilmektedir (FAO, 1985; Richards, 1954; Saleh vd., 1999; Wilcox, 1955). Bu durum, tuzluluğun kuraklık koşullarına karşı erken uyarı göstergesi olarak değerlendirilebileceğine işaret etmektedir.

Türkiye'de gerçekleştirilen SAR, %Na ve EC odaklı çalışmalarda, birçok havzada sulama suyu kalitesinin genel olarak kabul edilebilir sınırlar içerisinde yer aldığı bildirilmiştir. Karasu Nehri (Bilecik) üzerinde yapılan çalışmada SAR değerlerinin oldukça düşük seviyelerde ölçüldüğü ve sulama açısından herhangi bir sodyum riski oluşturmadığı belirtilmiştir (Alkan ve Meral, 2024). Murat Nehri'nde gerçekleştirilen değerlendirmelerde SAR ve %Na değerlerinin düşük sodyum tehlikesine karşılık geldiği, ancak bazı kesitlerde EC değerlerinin orta tuzluluk sınıfına ulaştığı rapor edilmiştir (Demir vd., 2016). Asi Havzası'nda yapılan çalışmalarda ise düşük akım ve kurak dönemlerde EC değerlerinde artış eğilimi gözlendiği ifade edilmiştir (Gümüş, 2017). Bu sonuçlar, sulama suyu kalitesinin mekânsal olduğu kadar hidrolojik koşullara bağlı olarak zamansal değişkenlik de gösterdiğini ortaya koymaktadır.

Hidrolojik kuraklığın değerlendirilmesinde akım temelli indeksler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda Akım Kuraklık İndeksi (SDI), farklı zaman ölçeklerinde hesaplanabilmesi sayesinde kısa ve uzun dönemli kuraklık süreçlerinin analizinde yaygın olarak tercih edilmektedir (Nalbantis ve Tsakiris, 2009; Tigkas vd., 2015). Son yıllarda yapılan çalışmalar, hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin doğrusal olmayan ve havzaya özgü bir yapı sergilediğini göstermektedir (Demir vd., 2016; Gümüş, 2017).

Son dönem çalışmaları, hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin doğrusal bir yapı göstermediğini, aksine havzaların hidrolojik özellikleri, jeolojik yapısı ve arazi kullanımının şekillendirildiğini ortaya koymaktadır. Aynı kuraklık şiddeti farklı havzalarda farklı su kalite tepkilerine neden olabilmekte; özellikle tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu bölgelerde yüzey akışı ile taşınan kirleticiler, yağışlı dönemlerde dahi su kalitesinde bozulmalara yol açabilmektedir. Bu nedenle kuraklık–su kalitesi ilişkilerinin değerlendirilmesinde tek bir parametre yerine çok parametreli ve havza temelli yaklaşımların kullanılması önerilmektedir (Jo vd., 2024; Mosley, 2015; Qiu vd., 2023; Van Vliet vd., 2023; Whitehead vd., 2009).

Genel olarak literatür değerlendirildiğinde, su kalitesi indeksleri ile kuraklık indekslerinin çoğunlukla ayrı disiplinler çerçevesinde ele alındığı; buna karşın iklim değişikliği baskısı altında bu iki bileşenin bütünleşik biçimde değerlendirilmesine yönelik çalışmaların hâlen sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, hidrolojik kuraklık ile tarımsal sulama açısından kritik su kalite göstergeleri arasındaki etkileşimin, havza bazında ve çok parametreli yaklaşımlar ile ele alınmasının literatürde giderek daha belirgin bir gereklilik hâline geldiğini göstermektedir.

Bu çerçevede literatür, hidrolojik kuraklık ile tarımsal sulama açısından kritik su kalite göstergeleri (SAR, %Na ve EC) arasındaki etkileşimin, tek bir parametre ya da tek bir indeks üzerinden genellenemeyecek kadar karmaşık ve havzaya özgü bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Mevcut çalışmalar, su kalitesi indeksleri ile kuraklık indekslerini çoğunlukla ayrı yaklaşımlar kapsamında ele almakta; kuraklık–su kalitesi ilişkisini ise büyük ölçüde doğrusal varsayımlar altında değerlendirmektedir. Bununla birlikte, iklim değişikliğine bağlı artan kuraklık baskısı altında, özellikle EC gibi tuzluluk göstergelerinin hidrolojik koşullara daha duyarlı tepkiler verdiği, buna karşın SAR ve %Na gibi sodyum temelli parametrelerin mekânsal ve zamansal olarak farklı davranışlar sergileyebildiği bildirilmektedir. Ancak, akım temelli bir hidrolojik kuraklık göstergesi olan SDI ile tarımsal sulama suyu kalitesini temsil eden çok

parametreli indekslerin, çok havzalı ve istatistiksel olarak bütünleşik bir yaklaşımla birlikte ele alındığı çalışmaların literatürde sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum, kuraklık–su kalitesi etkileşiminin doğrusal olmayan ve havzaya özgü yapısının, akım temelli kuraklık indeksleri ile çoklu su kalite göstergeleri birlikte kullanılarak değerlendirilmesini gerekli kılmaktadır. Bu doğrultuda, bu çalışmada hidrolojik kuraklık ile tarımsal sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkiler, SDI ile SAR, %Na ve CCME WQI kullanılarak farklı hidrolojik özelliklere sahip havzalarda istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiş ve kuraklık–su kalitesi etkileşiminin havza bazında ortaya konulması amaçlanmıştır.

2.4. Hidrolojik Kuraklık ve Su Kalitesi Alanında Trend Analizi Çalışmaları

Hidrolojik kuraklık ve su kalitesi çalışmalarında yalnızca mevcut durumun belirlenmesi yeterli görülmemekte, hidrolojik ve hidro-kimyasal değişkenlerde zaman içerisinde meydana gelen eğilimlerin ortaya konulması da büyük önem taşımaktadır. Uzun dönemli gözlem verileri üzerinde gerçekleştirilen trend analizleri; iklim değişikliği, arazi kullanımındaki değişimler ve antropojenik baskıların su kaynakları üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu amaçla hidrolojik araştırmalarda en yaygın kullanılan parametrik olmayan yöntemler arasında Mann–Kendall (MK) testi ile Sen Eğim yöntemi yer almakta, son yıllarda ise Yenilikçi Şen Trend Analizi (Innovative Trend Analysis, ITA) gibi yöntemler klasik istatistiksel yaklaşımları destekleyici araçlar olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemler sayesinde akım, kuraklık indisleri ve su kalite parametrelerinde meydana gelen uzun dönemli değişimler güvenilir biçimde belirlenebilmekte ve sürdürülebilir su kaynakları yönetimine yönelik bilimsel karar süreçleri desteklenebilmektedir.

Katipoğlu vd. (2022), Yeşilırmak Havzası'nda yedi akım gözlem istasyonuna ait SDI serilerini Mann–Kendall, Yenilikçi Şen Trend Analizi ve Theil–Sen yaklaşımı kullanarak değerlendirmiştir. Çalışmada birçok istasyonda hidrolojik kuraklık eğilimlerinin arttığı belirlenmiş, ayrıca Yenilikçi Şen Trend Analizi'nin eğilimlerin yorumlanmasında klasik Mann–Kendall testini destekleyen ayrıntılı bilgiler sunduğu ifade edilmiştir. Araştırmacılar, elde edilen bulgular doğrultusunda havza bazlı kuraklık yönetimi ve erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesinin önemini vurgulamışlardır.

Kumanlıoğlu (2020), Gediz Nehri üzerindeki Demirköprü Baraj Havzası'nda hidrolojik kuraklıkların zamansal değişimini incelemiştir. Araştırmada Acısu, Selendi, Deliiniş, Demirci alt havzaları ile Demirköprü Barajı'na ait akım verileri kullanılmış ve hidrolojik kuraklıklar

Akım Kuraklık İndeksi (SDI) ile aylık, üç aylık, altı aylık ve yıllık zaman ölçeklerinde değerlendirilmiştir. Kuraklık eğilimlerinin belirlenmesinde trend analizlerinden yararlanılmış ve havzada özellikle son yıllarda kurak dönemlerin daha uzun sürdüğü, hidrolojik kuraklık eğilimlerinin kuru koşullara yöneldiği belirlenmiştir. Araştırmacı, bu eğilimlerin sürdürülebilir su kaynakları yönetimi açısından dikkate alınması gerektiğini ve özellikle sulama ile baraj işletme planlamalarında hidrolojik kuraklık analizlerinin önemli bir karar destek aracı olduğunu vurgulamıştır.

Değer vd. (2023), Türkiye'nin ikinci büyük havzası olan Kızılırmak Havzası'nda hidrolojik kuraklık özelliklerini ve eğilimlerini araştırmıştır. Çalışmada farklı zaman ölçeklerinde (1, 3, 6, 9 ve 12 ay) Akım Kuraklık İndeksi (SDI) hesaplanmış ve hidrolojik kuraklık eğilimleri Yenilikçi Sen Trend Analizi (Innovative Trend Analysis, ITA) yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir. Bulgular, özellikle uzun zaman ölçeklerinde kuraklığın şiddeti ve süresinin arttığını, bazı istasyonlarda belirgin eğilimler göstermiştir. Araştırmacılar, hidrolojik kuraklığın zamansal ve mekânsal değişiminin belirlenmesinde SDI ile birlikte trend analizlerinin kullanılmasının, havza ölçeğinde su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından önemli bilgiler sağladığını belirtmişlerdir.

Yılmaz ve Tosunoğlu (2023), Türkiye genelinde 26 nehir havzasında yer alan 88 akım gözlem istasyonuna ait düşük akım serilerini inceleyerek iklim değişikliğinin düşük akımlar üzerindeki etkilerini değerlendirmiştir. Çalışmada öncelikle homojenlik analizleri uygulanmış, ardından Mann–Kendall (MK) ve Modified Mann–Kendall (mMK) testleri ile eğilimlerin istatistiksel anlamlılığı belirlenmiş, eğilimlerin büyüklüğü ise Sen Eğimi yöntemi yöntemiyle hesaplanmıştır. Bulgular, 34 istasyonda düşük akımların anlamlı biçimde azaldığını, yalnızca dört istasyonda artış eğilimi bulunduğunu göstermiştir. Araştırmacılar, özellikle azalan düşük akım eğilimlerinin Türkiye'nin su kaynakları yönetimi açısından önemli riskler oluşturduğunu ve Mann–Kendall ile Sen Eğimi yöntemlerinin hidrolojik zaman serilerindeki uzun dönemli değişimlerin belirlenmesinde güvenilir araçlar olduğunu belirtmişlerdir.

Modi (2024), Hindistan'ın Godavari Nehri boyunca yedi gözlem istasyonunda 1981–2005 yılları arasında ölçülen su kalitesi parametrelerinin uzun dönemli eğilimlerini incelemiştir. Çalışmada öncelikle verilerin dağılımı Kolmogorov–Smirnov ve Shapiro–Wilk testleri ile değerlendirilmiş, normal dağılım göstermeyen seriler için Mann–Kendall (MK) testi ve Sen Eğimi yöntemi kullanılarak zamansal eğilimler belirlenmiştir. Analizler muson öncesi, muson dönemi ve muson sonrası olmak üzere mevsimsel bazda gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar,

bazı istasyonlarda toplam alkalinite, kalsiyum ve toplam sertlik değerlerinde anlamlı artış eğilimleri, klorür, sodyum ve sülfat konsantrasyonlarında ise anlamlı azalış eğilimleri olduğunu göstermiştir. Araştırmacı, Mann–Kendall testi ile Sen Eğim yönteminin birlikte kullanılmasının su kalitesindeki uzun dönemli değişimlerin güvenilir biçimde belirlenmesinde etkili olduğunu ve su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine önemli katkılar sağladığını belirtmiştir.

Hirsch vd. (1982), aylık su kalitesi verilerinde uzun dönemli eğilimlerin güvenilir biçimde belirlenebilmesi amacıyla Mevsimsel Mann–Kendall (SMK) yöntemini geliştirmiştir. Araştırmacılar, klasik Mann–Kendall testinin mevsimsellik içeren çevresel veri setlerinde yanıltıcı sonuçlar verebileceğini, bu nedenle her mevsimin ayrı değerlendirilerek daha güvenilir eğilim sonuçları elde edilebileceğini göstermiştir. Çalışmada ayrıca eğilimlerin yönü ve büyüklüğünün belirlenmesi amacıyla Kendall's tau istatistiği ve Sen Eğimi yaklaşımının birlikte kullanılmasının uygun olduğu belirtilmiştir. Günümüzde nehir su kalitesi, akım serileri ve hidrolojik kuraklık çalışmalarının büyük bölümünde Mevsimsel Mann–Kendall (SMK) yöntemi temel trend analizi yaklaşımı olarak kullanılmaktadır.

Sen (1968), parametrik varsayımlara ihtiyaç duymadan zaman serilerindeki doğrusal eğilimlerin büyüklüğünü belirlemek amacıyla Sen Eğimi yöntemini geliştirmiştir. Yöntem, tüm gözlem çiftlerinden elde edilen eğimlerin medyanını esas alarak eğilimin yönünü ve büyüklüğünü hesaplamakta olup, aykırı gözlemlerden daha az etkilenmesi nedeniyle hidrolojik ve çevresel zaman serilerinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Günümüzde Mann–Kendall testi ile birlikte kullanılarak yalnızca eğilimin istatistiksel anlamlılığı değil, aynı zamanda değişimin miktarı da ortaya konulabilmektedir.

Wang vd. (2023), Çin'deki Huai Nehri Havzasında 2012–2019 yılları arasında arazi kullanımındaki değişimlerin su kalitesi üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Mevsimsel Mann–Kendall (SMK) testi ve Sen Eğimi yöntemi kullanılarak su kalitesindeki zamansal eğilimler belirlenmiş, ayrıca arazi kullanımındaki değişimlerin su kalitesi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, özellikle tarım alanları ve kentsel yerleşimlerin su kalitesindeki mevsimsel değişimleri önemli ölçüde etkilediğini, Mevsimsel Mann–Kendall ve Sen Eğimi yöntemlerinin ise uzun dönemli eğilimlerin belirlenmesinde güvenilir sonuçlar sağladığını göstermiştir.

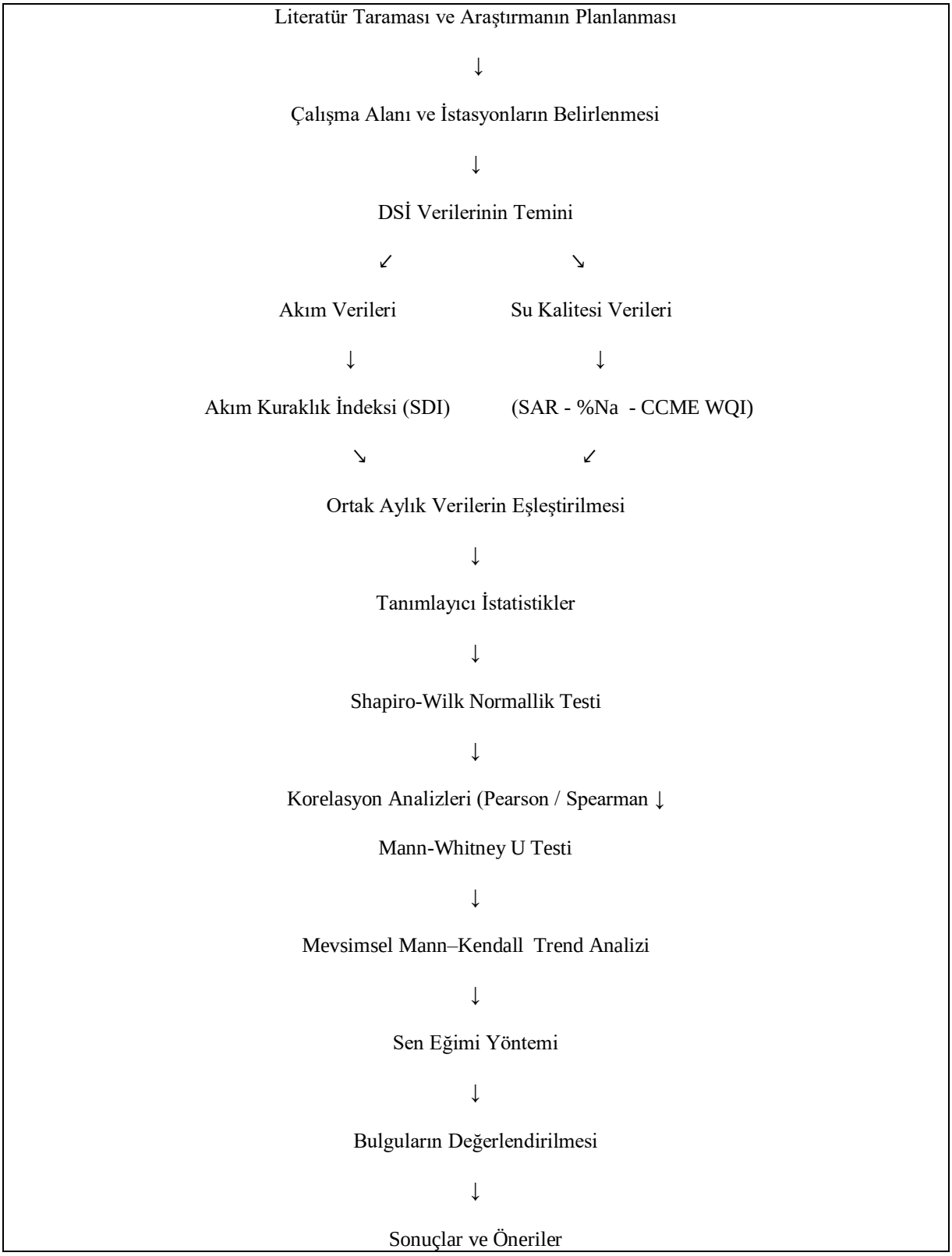
Choi vd. (2023), Güney Kore'de akarsu su kalitesinin zamansal değişimini değerlendirmek amacıyla uzun dönemli izleme verilerini analiz etmiştir. Araştırmada su kalite parametrelerindeki eğilimlerin belirlenmesi için Mann–Kendall testi uygulanmış, eğilimlerin yönü ve büyüklüğü Sen Eğimi yöntemi ile hesaplanmıştır. Mann–Kendall ve Sen Eğimi yöntemlerinin su kalitesindeki zamansal değişimlerin değerlendirilmesinde etkili analiz araçları olduğu belirtilmiştir.

İncelenen çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde, hidrolojik kuraklık ve su kalitesi araştırmalarında en yaygın kullanılan parametrik olmayan trend analiz yöntemlerinin Mann–Kendall, Mevsimsel Mann–Kendall ve Sen Eğimi yöntemi olduğu görülmektedir. Bu yöntemler, hidrolojik ve hidro-kimyasal zaman serilerindeki eğilimlerin güvenilir biçimde belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bununla birlikte, literatürde hidrolojik kuraklık göstergeleri ile sulama suyu kalite indekslerinin uzun dönemli eğilimlerini aynı çalışma kapsamında birlikte değerlendiren araştırmaların sınırlı olduğu dikkat çekmektedir. Bu tez kapsamında ise SDI ile birlikte SAR, %Na ve CCME WQI parametrelerinin eğilimleri Mevsimsel Mann–Kendall ve Sen Eğimi yöntemleri kullanılarak birlikte değerlendirilmiş ve hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin daha kapsamlı biçimde ortaya konulması amaçlanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu çalışmada hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla sistematik bir araştırma süreci izlenmiştir. Öncelikle çalışma alanları belirlenmiş ve Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ)'nden temin edilen akım ile su kalitesi verileri kullanılmıştır. Hidrolojik kuraklık, Akım Kuraklık İndeksi (SDI); sulama suyu kalitesi ise Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR), Sodyum Yüzdesi (%Na) ve Kanada Su Kalitesi İndeksi (CCME WQI) kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen veriler tanımlayıcı istatistikler, normallik testleri, korelasyon analizleri, Mann–Whitney U testi, Mevsimsel Mann–Kendall trend analizi ve Sen Eğimi yöntemi ile analiz edilmiştir. Çalışmanın genel akış şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.



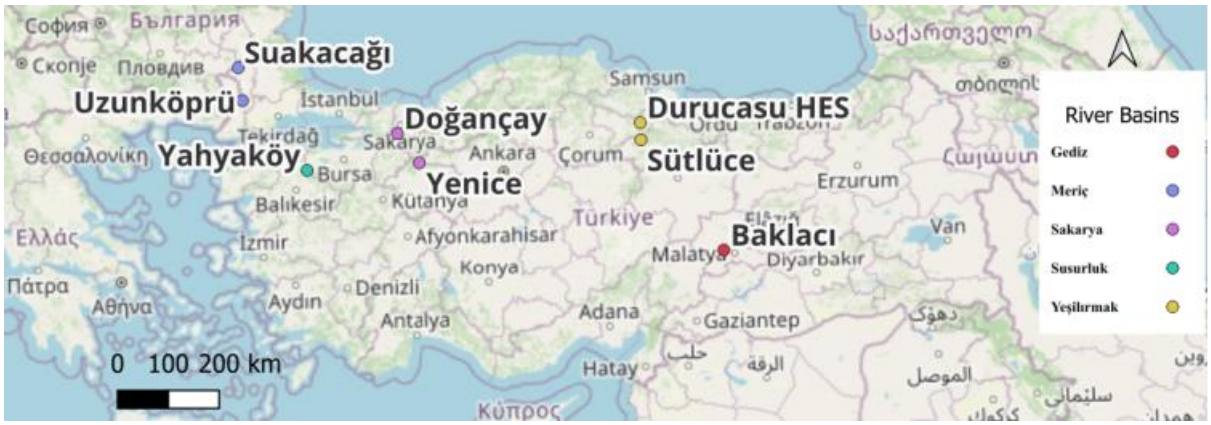
Şekil 3.1. Çalışmanın genel akış şeması

3.1.1. Çalışma alanı

Bu çalışma, Türkiye'nin farklı hidrolojik, jeomorfolojik ve iklimsel özellikler sergileyen başlıca akarsu havzalarında hidrolojik kuraklık ile tarımsal sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesi amacıyla yürütülmüştür. Araştırma kapsamında Meriç, Sakarya, Yeşilırmak, Susurluk ve Gediz havzalarında yer alan toplam sekiz izleme istasyonu seçilmiştir. Çalışma alanları, farklı akım rejimlerini, arazi kullanım özelliklerini ve tarımsal faaliyet yoğunluklarını temsil edecek şekilde belirlenmiştir.

İstasyonların seçiminde, uzun dönemli akım ve su kalitesi verilerine erişilebilmesi, havzaların farklı hidrolojik özelliklere sahip olması ve Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerini temsil etmesi dikkate alınmıştır. Ayrıca seçilen istasyonlar, kuraklık koşullarının su kalitesi üzerindeki etkilerinin farklı çevresel koşullar altında karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sayede hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin yalnızca tek bir havza özelinde değil, farklı havzalardaki değişiminin de ortaya konulması amaçlanmıştır.

İncelenen havzaların ve örnekleme istasyonlarının Türkiye genelindeki mekânsal dağılımı Şekil 3.2'de sunulmuştur. Çalışma alanlarının harita görselleştirmesi QGIS 3.x yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır.

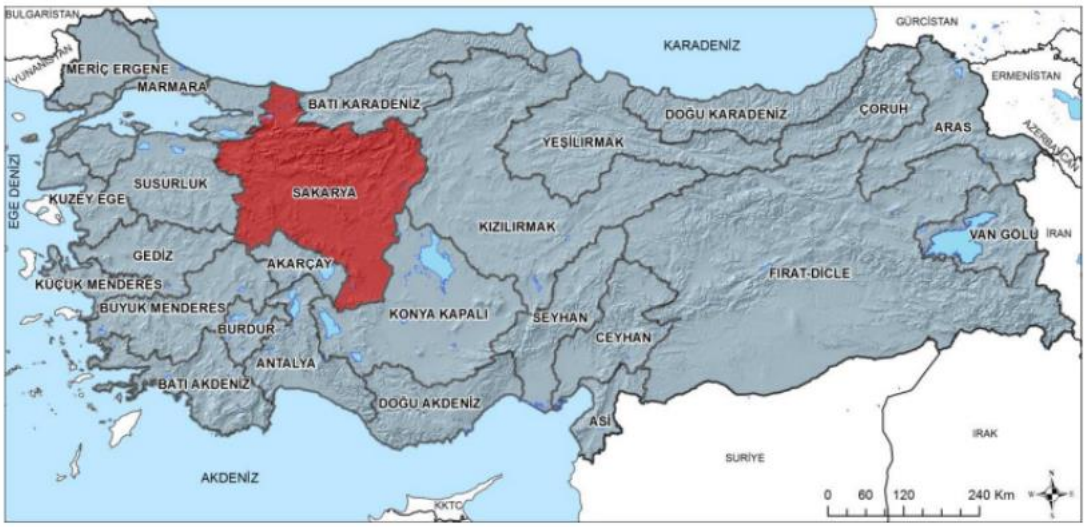


Şekil 3.2. Çalışma alanı ve örnekleme istasyonlarının Türkiye'deki konumu

3.1.1.1. Sakarya Havzası (Doğançay ve Yenice istasyonları)

Yaklaşık 63.303 km²'lik bir drenaj alanına sahip olan Sakarya Nehri Havzası, farklı jeomorfolojik, hidrolojik ve jeolojik özelliklere sahip alanların bir araya gelmesiyle oluşmuş geniş bir su toplama havzasıdır. Havza, bünyesinde barındırdığı topoğrafik ve iklimsel

çeşitlilik nedeniyle karmaşık bir hidrolojik yapıya sahip olup, bu özellikleriyle Türkiye'nin önemli nehir havzalarından biri olarak değerlendirilmektedir. Sakarya Havzası'nın Türkiye'deki havza sınırları içerisindeki konumu Şekil 3.3 'de sunulmaktadır.



Şekil 3.3. Sakarya Havzası'nın Türkiye'deki konumu (T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı SYGM, 2023)

Sakarya Nehri, Eskişehir ili Çifteler ilçesi yakınlarında yer alan Sakarbaşı kaynaklarından doğmakta olup, yan kollarıyla birlikte toplam uzunluğu yaklaşık 824 km'ye ulaşmaktadır. Ancak, nehrin başlangıç kesiminde yer alan bazı kaynakların kuruması nedeniyle fiili akış uzunluğu yaklaşık 720 km olarak kabul edilmektedir. Sakarya Nehri'nin Sakarya ili sınırları içerisinden geçen kesiminin uzunluğu ise yaklaşık 159,5 km'dir.

Sakarya Nehri Havzası, Anadolu Yarımadası'nın kuzeybatısında yer almakta olup, 29°16′–33°15′ doğu boylamları ile 37°57′–41°12′ kuzey enlemleri arasında konumlanmaktadır. Havza, batıda Susurluk Havzası, güneyde Akarçay Havzası ve Konya Kapalı Havzası, doğuda Kızılırmak Havzası ve Batı Karadeniz Havzası ile çevrilidir. Bu konumsal özellikler, Sakarya Havzası'nı bölgesel ölçekte hidrolojik etkileşimlerin yoğun olduğu stratejik bir alan hâline getirmektedir (SYGM, 2023).

Sakarya Nehri, Kızılırmak ve Fırat nehirlerinden sonra Türkiye'nin en uzun üçüncü akarsuyu olup, Kuzeybatı Anadolu'nun en büyük akarsuyu niteliğindedir. Nehir, Eskişehir ili Çifteler ilçesi sınırları içerisinde yer alan Sakarbaşı kaynaklarından doğmakta; başlangıçta İç Anadolu yönünde akış gösterdikten sonra Polatlı civarında kuzeye yönelmektedir. Bu kesimde en önemli kollarından biri olan Porsuk Çayı ile birleşen Sakarya Nehri, sırasıyla Ankara Çayı,

Kirmir Çayı ve Aladağ Deresi gibi yan kolları bünyesine katarak Bilecik ili sınırlarına girmektedir.

Nehir, Paşalar ve Geyve Boğazları arasında Karasu, Göksu ve Geyve Suyu gibi önemli kollarla birleşmekte; Geyve Boğazı'ndan çıktıktan sonra Adapazarı Ovası'na ulaşmaktadır. Bu ovada sağdan Mudurnu Çayı, Sapanca Gölü'nün fazla sularını drene eden Çark Suyu ile birleşen Sakarya Nehri, kuzeye yönelerek Karasu ilçesi yakınlarında, Sakarya Ağzı olarak bilinen noktadan Karadeniz'e dökülmektedir.

Sakarya Nehri'nin akım rejimi belirgin bir mevsimsellik göstermekte olup, en yüksek debiler ilkbahar aylarında, en düşük debiler ise yaz döneminde (Temmuz–Eylül) gözlenmektedir. Düşük akım koşulları, hidrolojik kuraklık etkilerini belirginleştirerek nehirdeki seyreltme kapasitesini azaltmakta ve askıda katı madde ile diğer su kalitesi parametrelerinin konsantrasyonlarında artışlara yol açabilmektedir (Çelebi ve Özdemir, 2015). Ayrıca havza genelinde yer alan baraj ve regülasyon yapıları, doğal akım rejimini kısmen değiştirerek akım–su kalitesi ilişkileri üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, Sakarya Havzası içerisinde yer alan Sakarya Nehri'nin Doğançay ve Yenice (Nallıhan) kesimleri çalışma alanı olarak seçilmiştir. Doğançay kesimi, daha dar vadi yapısı ve yüksek eğim değerleri ile karakterize edilirken; Yenice kesimi, plato karakterli topoğrafya, farklı sediment taşınım koşulları ve baraj etkilerinin daha belirgin olduğu bir hidromorfolojik yapıya sahiptir. Bu iki kesim arasındaki topoğrafik ve hidrodinamik farklılıklar, akım koşulları ve su kalitesi parametrelerinin davranışlarını karşılaştırmalı olarak inceleme olanağı sunmaktadır. Bu bağlamda Doğançay ve Yenice kesimleri, hidrolojik kuraklık ile yüzey suyu kalitesi arasındaki etkileşimin havza içi ölçekte değerlendirilmesi açısından temsil edici ve kritik çalışma alanları olarak öne çıkmaktadır (SYGM, 2023).

3.1.1.2. Yeşilırmak Havzası (Durucasu HES ve Sütlüce istasyonları)

Yeşilırmak Havzası yaklaşık 39.595 km^2 'lik yağış alanı ile Türkiye'nin toplam alanın %5'ini oluşturmaktadır. Havza Türkiye'nin kuzey kesiminde yer alıp Kızılırmak, Fırat, Doğu Karadeniz ve Çoruh havzalarına komşudur (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Yeşilırmak Havzası'nın Türkiye'deki konumu (Tarım ve Orman Bakanlığı SYGM, 2023)

Yeşilırmak Havzası'nda, Yeşilırmak Nehri üzerindeki Durucasu HES kesimi ile Sütlüce kesimi çalışma alanı olarak incelenmiştir. Yeşilırmak Havzası, Türkiye'nin Karadeniz'e drene olan en önemli nehir sistemlerinden biri olup, Kelkit, Çekerek ve Tersakan çayları başta olmak üzere çok sayıda önemli yan kol tarafından beslenmektedir. Bu yan kollar, havza genelinde akım rejiminin şekillenmesinde, yüzeysel akış miktarlarının dağılımında ve çözünmüş–askıda maddelerin ana akarsuya taşınmasında belirleyici rol oynamaktadır.

Yeşilırmak Havzası, kıyı kesimlerinde Karadeniz ikliminin nemli ve ılıman etkileri ile iç ve güney kesimlerinde karasal iklim özelliklerinin birlikte görüldüğü bir geçiş alanı niteliğindedir. Bu durum, havza genelinde yağış ve sıcaklık rejiminin mekânsal olarak farklılaşmasına neden olmakta; dolayısıyla akım sürekliliği ve hidrolojik kuraklık koşulları havzanın farklı kesimlerinde değişkenlik göstermektedir. Özellikle yaz aylarında yağışların azalması ve buharlaşmanın artması, akım miktarlarında belirgin düşüşlere yol açarak düşük akım koşullarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Havzada yaz aylarında belirginleşen bu kurak koşullar, nehir sisteminin seyreltme kapasitesini azaltmakta ve su kalitesi üzerindeki baskıyı artırmaktadır. Akım miktarının azalmasıyla birlikte, askıda katı madde, çözünmüş iyonlar ve diğer su kalitesi parametrelerinin konsantrasyonlarında artışlar gözlenebilmektedir. Bu etki, özellikle tarımsal sulamanın yoğun olarak yürütüldüğü ova kesimlerinde daha belirgin hâle gelmektedir. Sulama amaçlı su çekimleri, düşük akım dönemlerinde nehirdeki mevcut su miktarını daha da azaltarak hidrolojik kuraklık etkilerini güçlendirmektedir (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2024).

Çalışma kapsamında incelenen Sütlüce kesimi, doğal akım koşullarının görece daha baskın olduğu ve akım rejimindeki mevsimsel değişkenliğin açık biçimde izlenebildiği bir nehir kesimini temsil etmektedir. Bu kesimde, özellikle düşük akım dönemlerinde hidrolojik kuraklığın su kalitesi parametreleri üzerindeki doğrudan etkilerinin değerlendirilmesi mümkün olmaktadır. Buna karşılık, Durucasu HES kesimi, akımın baraj ve regülasyon yapıları tarafından kısmen kontrol edildiği bir hidromorfolojik ortam sunmaktadır. Bu kesimde, enerji üretimi, mansap ekosistem gereksinimleri ve tarımsal su kullanımı gibi insan kaynaklı müdahaleler, doğal akım rejimini değiştirebilmekte ve su kalitesi dinamikleri üzerinde belirleyici olabilmektedir.

Durucasu HES kesiminde akımın düzenlenmesi, özellikle düşük akım ve kuraklık dönemlerinde nehrin hidrodinamik özelliklerini ve seyreltme kapasitesini etkilemekte; bu durum, doğal akım koşullarının hâkim olduğu kesimlerle karşılaştırmalı analiz yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu bağlamda, Sütlüce ve Durucasu HES kesimleri, doğal akım rejimi ile insan müdahalesi altındaki akım koşullarını birlikte temsil etmeleri bakımından önem taşımaktadır. Ayrıca bu iki kesim arasındaki hidromorfolojik ve hidrodinamik farklılıklar, hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin havza içi ölçekte daha ayrıntılı ve karşılaştırmalı olarak incelenmesine imkân tanımaktadır.

Bu nedenlerle, Yeşilırmak Nehri'nin Sütlüce ve Durucasu HES kesimleri; farklı akım koşullarını, kuraklık dönemlerinde değişen seyreltme kapasitelerini ve su kalitesi parametrelerinin mekânsal davranışlarını birlikte değerlendirebilme olanağı sunmaları nedeniyle, hidrolojik kuraklık ile yüzey suyu kalitesi arasındaki etkileşimin analiz edilmesi açısından uygun, temsil edici ve kritik çalışma alanları olarak seçilmiştir.

3.1.1.3. Gediz Havzası (Alaşehir Çayı Baklacı istasyonu)

Gediz Havzası, Türkiye'nin batısında Ege Bölgesi sınırları içerisinde yer almakta olup, sularını Gediz Nehri ve yan kolları aracılığıyla Ege Denizi'ne boşaltan önemli bir drenaj havzasıdır. Havza; kuzeyde Kuzey Ege ve Susurluk Havzaları, güneyde Küçük Menderes Havzası, doğuda ise İç Batı Anadolu havzaları ile komşudur. Coğrafi olarak 38°04′–39°13′ kuzey enlemleri ile 26°42′–29°45′ doğu boylamları arasında konumlanan Gediz Havzası, yaklaşık 17.137 km²'lik yüzölçümü ile Türkiye yüz ölçümünün yaklaşık %2,2'sini oluşturmaktadır (OSİB, 2013; TÜBİTAK MAM, 2018).

Gediz Havzası, Ege Denizi ile İç Batı Anadolu arasında bir geçiş alanı niteliği taşımakta olup, topoğrafik, jeolojik ve iklimsel özellikler bakımından belirgin bir çeşitlilik sergilemektedir. Havzanın kuzey ve doğu kesimleri dağlık ve engebeli bir yapıya sahipken, orta ve batı kesimlerinde geniş alüvyal ovalar yer almaktadır. Bu morfolojik yapı, yüzeysel akış süreçleri, sediment taşınımı ve yeraltı suyu–yüzey suyu etkileşimi üzerinde belirleyici olmaktadır.

Havzaya adını veren Gediz Nehri, yaklaşık 275 km uzunluğunda olup havzanın ana yüzeysel su kaynağını oluşturmaktadır. Gediz Nehri'nin ana kolu olan Murat Çayı, Kütahya ili sınırları içerisinde yer alan Murat Dağı'ndan doğmakta; çeşitli yan derelerin katılımı ile Gediz Çayı adını almakta ve güney–güneybatı yönünde akış göstermektedir. Gediz Nehri, Demirköprü Barajı'ndan sonra Alaşehir Çayı ile birleşerek batıya yönelmekte, Manisa Ovası ve Menemen Ovası üzerinden geçerek Ege Denizi'ne dökülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, Gediz Havzası içerisinde yer alan Alaşehir Çayı Alt Havzası'nda bulunan Baklacı kesimi çalışma alanı olarak seçilmiştir. Alaşehir Çayı Alt Havzası, Gediz Havzası'nın güneydoğu kesiminde yer almakta olup yaklaşık 3.797 km²'lik alanı ile havzanın yaklaşık %22'sini oluşturmaktadır. Alt havza; Alaşehir, Salihli, Sarıgöl, Ahmetli ve Turgutlu ilçelerini kapsamakta ve hem nüfus yoğunluğu hem de tarımsal üretim açısından havzanın en baskın alt sistemlerinden birini temsil etmektedir (OSİB, 2013).

Alaşehir Çayı, güneydoğu–kuzeybatı doğrultusunda akarak Salihli yakınlarında Gediz Nehri ile birleşmekte olup, Gediz Grabeni içerisinde gelişmiş önemli bir akarsu sistemidir. Alaşehir ve Sarıgöl ovaları, graben yapısı içerisinde oluşmuş geniş çöküntü alanları olup, çay bu alanları drene ederek havzanın hidrolojik dengesinde kritik bir rol üstlenmektedir. Alaşehir Çayı'nın bu jeomorfolojik konumu, akım hızı, taşkın potansiyeli ve sediment taşınımı üzerinde doğrudan etkili olmaktadır.

Alaşehir Çayı Alt Havzası'nda batı kesimlerinde metamorfik, doğu kesimlerinde ise Neojen yaşlı kırıntılı birimler yaygın olarak bulunmaktadır. Bu jeolojik yapı, özellikle sediman üretimi, askıda katı madde konsantrasyonları ve iletkenlik (EC) gibi su kalitesi parametrelerinin davranışı üzerinde belirleyici olmaktadır. Neojen birimlerin alterasyona açık yapısı, yağışlı dönemlerde sediment taşınımını artırırken; yaz aylarında düşük akım koşulları altında çözünmüş iyon konsantrasyonlarının yükselmesine neden olabilmektedir (Eser, 2014).

Alaşehir Çayı'nın yıllık toplam akımı yaklaşık 105,96 hm^3, yıllık ortalama akımı ise 3,38 m^3/s olarak ölçülmüştür. Gediz Nehri üzerindeki Demirköprü Barajı, Alaşehir Çayı üzerinde ve yan kollarında bulunan sulama amaçlı regülasyon yapıları ile birlikte, havza genelindeki akım rejimini önemli ölçüde etkilemektedir. Özellikle yaz aylarında sulama amaçlı su çekimleri, doğal akım rejimini değiştirerek düşük akım koşullarının daha belirgin hâle gelmesine neden olmaktadır.

Havzada yaygın olarak bulunan alüvyal birimler, yüksek geçirgenlik özellikleri nedeniyle yüzeysel akışların önemli bir bölümünün yeraltı suyuna sızmasına olanak tanımaktadır. Bu durum, yüzeysel su–yeraltı suyu etkileşiminin güçlü olduğu karmaşık bir hidrolojik yapı ortaya koymakta; akarsu yatağında ölçülen debi değerlerinin bir kısmının evsel ve endüstriyel deşarjlarla desteklenmesine neden olmaktadır (Eser, 2014). Bu durum, özellikle su kalitesi değerlendirmelerinde doğal ve antropojenik etkilerin birlikte ele alınmasını gerekli kılmaktadır.

Gediz Havzası ve özellikle Alaşehir Çayı Alt Havzası, Türkiye'nin en yoğun tarımsal üretim yapılan bölgelerinden biri olup, başta bağcılık olmak üzere yüksek gelirli tarımsal faaliyetlerle öne çıkmaktadır. Alaşehir ve Salihli ovalarında yoğun sulamalı tarım yapılmakta; buna bağlı olarak gübre ve zirai ilaç kullanımı yaygın biçimde gerçekleşmektedir. Tarımsal drenaj suları, özellikle düşük akım dönemlerinde yüzeysel su kalitesi üzerinde baskı oluşturmaktadır (Gürsoy Haksevenler ve Ayaz, 2021).

Buna ek olarak, Alaşehir Çayı boyunca evsel atıksu deşarjları ve jeotermal kaynaklı deşarjlar yüzeysel su kalitesi üzerinde önemli bir etki yaratmaktadır. Bu deşarjlar, özellikle yaz aylarında akımın azalmasıyla birlikte nehirdeki seyreltme kapasitesinin düşmesine ve bazı su kalitesi parametrelerinin konsantrasyonlarında artışlara neden olmaktadır. Bu durum, tarımsal sulama suyu kalitesi açısından risk oluşturan bir baskı unsuru olarak değerlendirilmektedir.

Havzada yaygın olan alüvyal topraklar, kireçsiz kahverengi orman toprakları ve rendzinalar, sulama suyu kalitesi açısından yüksek duyarlılığa sahiptir. Özellikle sodyum ve tuzluluk kaynaklı riskler, bu toprak gruplarında yapısal bozulma ve verim kaybı potansiyeli taşımaktadır. Yaz aylarında belirginleşen kuraklık koşulları ve düzensiz akım rejimi, Alaşehir Çayı'nın seyreltme kapasitesini azaltarak sulama suyu kalitesinin hidrolojik koşullara daha duyarlı hâle gelmesine neden olmaktadır.

Bu bağlamda, Baklacı kesimi; yoğun tarımsal faaliyetlerin, jeolojik–hidromorfolojik özelliklerin, baraj ve regülasyon etkilerinin ve kuraklık dönemlerinde değişen akım koşullarının birlikte etkili olduğu bir nehir kesimini temsil etmektedir. Bu özellikleriyle Baklacı kesimi, hidrolojik kuraklık ile tarımsal sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin değerlendirilmesi açısından havza ölçeğinde temsil edici, karşılaştırmaya uygun ve kritik bir çalışma alanı olarak seçilmiştir.

3.1.1.4. Susurluk Havzası (Simav Çayı Yahyaköy istasyonu)

Susurluk havzası Türkiye'nin batısında, 39° - 40° kuzey enlemleri ile 27° - 30° doğu boylamları arasında yer almaktadır. Susurluk havzası yaklaşık 24.319 km^2 'lik yağış alanı ile Türkiye'nin toplam alanın % 3.1'ini oluşturmaktadır. Havza Türkiye'nin kuzey batısında yer alıp, Sakarya, Gediz, Kuzey Ege ve Marmara havzalarına komşudur (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Susurluk Havzası'nın Türkiye'deki konumu

Susurluk Havzası, Türkiye'nin kuzeybatısında yer almakta olup Marmara Bölgesi'nin en önemli drenaj sistemlerinden birini oluşturmaktadır. Havza; doğuda Murat, Gümeş, Yirce ve Uludağlar, güneyde Şaphane ve Simav Dağları, batıda Madra ve Deliçal Dağları su bölümü çizgisi ve kuzeyde Karadağ, Mudanya Tepeleri ile Marmara Denizi tarafından çevrelenmektedir. Bu sınırlar, havzanın hidrolojik, jeomorfolojik ve iklimsel özelliklerinin şekillenmesinde belirleyici rol oynamaktadır. Yaklaşık 24.319 km² yağış alanına sahip olan Susurluk Havzası, Türkiye yüzölçümünün yaklaşık %3,1'ini kapsamaktadır.

Havzada düşen yağışlar, farklı büyüklük ve hidrografik özelliklere sahip çok sayıda akarsu aracılığıyla Marmara Denizi'ne ve aynı zamanda Uluabat Gölü ile Manyas (Kuş)

Gölü'ne drene olmaktadır. Bu yönüyle Susurluk Havzası, hem denizel hem de kapalı göl sistemlerini besleyen karmaşık bir hidrolojik yapıya sahiptir. Havza içerisinde Simav Çayı, Nilüfer Çayı, Mustafakemalpaşa Çayı ve Kocaçay başlıca yüzeysel su kaynaklarını oluşturmakta olup, bu akarsular bölgedeki tarımsal sulama, ekosistem sürekliliği ve yerleşim alanlarının su ihtiyacının karşılanması açısından kritik öneme sahiptir.

Susurluk Havzası, hidrografik ve yönetimsel açıdan altı alt havzadan oluşmaktadır. Bunlar; Bandırma–Kapıdağ–Kocaçay–Manyas Alt Havzası, Göynük–Simav–Susurluk Alt Havzası, Emet Alt Havzası, Mustafakemalpaşa–Uluabat Alt Havzası, Nilüfer Alt Havzası ve Orhaneli Alt Havzasıdır. Bu alt havzalar, farklı jeolojik, topoğrafik ve hidrolojik özellikler sergilemekte olup, havza genelinde akım rejimi ve su kalitesi üzerinde mekânsal farklılıkların ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

Susurluk Havzası'nın topoğrafyası genel olarak doğu–batı doğrultusunda uzanan dağ sistemleri ve bu dağlar arasında yer alan ova ve çöküntü alanları ile karakterizedir. Havza sınırları içerisinde Marmara Bölgesi'nin en yüksek noktası olan Uludağ (2.543 m) yer almakta olup, bu kütle hem orografik yağışların oluşmasında hem de yüzeysel akış rejiminin belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Uludağ'ın güneyinde ve batısında yer alan Orhaneli ve Bursa ovaları, havzanın önemli alüvyal düzlüklerini oluşturmaktadır.

Havza içerisinde ayrıca Karadağ, Çataldağ, Alaçam Dağları, Akdağ, Eğrigöz Dağı ve Simav Dağı gibi önemli yükseltiler bulunmaktadır. Bu dağlık alanlar, özellikle havzanın güney ve doğu kesimlerinde yüzey eğiminin artmasına, akarsu ağının sıklaşmasına ve erozyon süreçlerinin hızlanmasına neden olmaktadır. Kütahya ili sınırları içerisinde yer alan Tavşanlı, Örencik ve Simav ovaları, hem tarımsal üretim hem de yeraltı suyu potansiyeli açısından havzanın en önemli düzlüklü alanlarıdır.

Bu çalışma kapsamında incelenen Simav Çayı'nın Yahyaköy kesimi, Susurluk Havzası'nın hidrolojik açıdan en önemli alt sistemlerinden biri olan Göynük–Simav–Susurluk Alt Havzası içerisinde yer almaktadır. Simav Çayı, kaynağını Şaphane Dağları'ndan almakta, Simav Ovası boyunca akarak Susurluk Ovası üzerinden Marmara Denizi'ne ulaşmaktadır. Yaklaşık 175 km uzunluğa sahip olan Simav Çayı, Marmara Denizi'ne dökülen en büyük akarsulardan biridir.

Simav Çayı'nın akım rejimi mevsimsel olarak belirgin değişkenlik göstermektedir. İlkbahar aylarında yağış ve kar erimelerine bağlı olarak akım artmakta, yaz aylarında ise

yağışların azalması ve sulama amaçlı su kullanımı nedeniyle düşük akım koşulları oluşmaktadır. Bu düşük akım dönemleri, nehirde seyreltme kapasitesinin azalmasına ve özellikle askıda katı madde ile çözünmüş iyon konsantrasyonlarının artmasına yol açabilmektedir.

Susurluk Havzası'nda baskın toprak gruplarını kireçsiz kahverengi orman toprakları, kahverengi orman toprakları ve alüvyal topraklar oluşturmaktadır. Bu toprak grupları, özellikle havzanın ova kesimlerinde tarımsal üretimin yoğunlaşmasına olanak sağlamaktadır. Simav ilçesi ve çevresinde tarımsal faaliyetler ağırlıklı olarak tahıl, baklagil, yem bitkileri ve bağ-bahçe tarımına dayalıdır. Sulama uygulamaları, bu bölgede yüzeysel su kaynaklarına olan bağımlılığı artırmakta ve sulama suyu kalitesini tarımsal sürdürülebilirlik açısından kritik hâle getirmektedir.

Susurluk Havzası, Akdeniz iklimi ile Karadeniz iklimi arasında geçiş özelliği göstermektedir. Kış ayları genellikle ılık ve yağışlı, yaz ayları ise sıcak ve görece kurak geçmektedir. Yıllık yağışların büyük bölümü kış ve ilkbahar aylarında gerçekleşmekte, yaz döneminde ise belirgin kuraklık koşulları oluşmaktadır. Havza genelinde yıllık ortalama sıcaklık yaklaşık 12,6 °C olup, en sıcak ay Temmuz, en soğuk ay ise Ocak ayıdır.

Yaz aylarında belirginleşen bu kurak koşullar, Simav Çayı'nın akım miktarını azaltmakta ve sulama suyu kalitesi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Düşük akım dönemlerinde, tarımsal faaliyetler, yüzeysel suya karışan besin tuzları ve diğer kirletici girdiler, su kalitesi parametrelerinde artışlara neden olabilmektedir.

Susurluk Havzası'nda, havzanın hidrolojik ve tarımsal açıdan önemli yüzeysel su bileşenlerinden biri olan Simav Çayı'nın Yahyaköy kesimi çalışma alanı olarak değerlendirilmiştir. Susurluk Havzası, Akdeniz ve Karadeniz iklim tipleri arasında geçiş özelliği göstermekte olup, bu durum havzada belirgin mevsimsel yağış ve akım farklılıklarının oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle yaz aylarında yağışların azalmasıyla birlikte kurak koşullar yaygınlaşmakta, bu durum yüzeysel akımların azalmasına ve nehirlerin seyreltme kapasitesinin düşmesine yol açmaktadır.

Simav Çayı, havza genelinde tarımsal sulama açısından önemli bir su kaynağı niteliği taşımakta olup, çevresinde yürütülen yoğun tarımsal faaliyetler yüzeysel su kalitesi üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Havzada yaygın olarak bulunan kireçsiz kahverengi ve kahverengi orman toprakları ile alüvyal topraklar, sulama uygulamaları sırasında iyonik bileşimi ve

tuzluluk özelliklerini etkileyebilecek potansiyele sahiptir. Bu kapsamda, tarımsal üretim desenleri, gübre ve sulama uygulamaları ile birlikte değerlendirildiğinde, sulama suyu kalitesi üzerinde toprak–su etkileşiminin belirleyici rol oynadığı görülmektedir (Orman ve Su İşleri Bakanlığı, 2018).

Simav Çayı'nın Yahyaköy kesimi, hem havzanın orta kesimlerinde yer alması hem de tarımsal kullanımın yoğun olduğu alanları temsil etmesi nedeniyle hidrolojik kuraklık koşullarının su kalitesi üzerindeki etkilerinin incelenmesi açısından uygun bir örnek alan oluşturmaktadır. Mevsimsel akım değişkenliği, yaz dönemlerinde belirginleşen düşük akım koşulları ve havzadaki farklı toprak özellikleri birlikte değerlendirildiğinde, bu kesim hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki etkileşimlerin ortaya konulması açısından kritik ve temsil edici bir çalışma alanı niteliği taşımaktadır.

3.1.1.5. Meriç Havzası (Tunca Nehri Suakacağı istasyonu)

Tunca Nehri Havzası'nın önemli bir kısmı Bulgaristan'da bulunmakta, toplam yüzölçümü 7.884 km² olup, bunun 586,43 km²'si Edirne sınırları içerisindedir. Bulgaristan'ın Karadağ Bölgesinde 1940m yükseklikten doğan Tunca nehri, 384 km uzunluğunda olup 12 km'si Türkiye-Bulgaristan sınırını oluşturmaktadır (ORSAM, 2011). Türkiye sınırları içerisinde 40 km yol aldıktan sonra Tunca nehri Meriç nehri ile birleşmektedir. Tunca nehri Bulgaristan sınırları içerisinde Sliven, Yambol, Elhovo gibi yerleşim merkezleri içinden geçerek, Edirne ili Suakacağı Köyü mevkiinden Türkiye sınırlarına girer (Güher ve Demir, 2018).Tunca Nehri, Arda ve Ergene Nehirleri ile birlikte, Doğu Balkanlar'ın en büyük akarsu sistemlerinden biri olan Meriç Havzası'nın önemli bir bölümünü oluşturmaktadır.

Tunca Nehri, Bulgaristan sınırları içerisinde Sliven, Yambol ve Elhovo gibi yerleşim alanlarından geçerek Edirne ili Suakacağı Köyü mevkiinden Türkiye sınırlarına girmekte ve Edirne kent merkezinde Meriç Nehri ile birleşmektedir. Bu özelliğiyle Tunca Nehri, sınır aşan su niteliği taşıyan Meriç Havzası'nın hidrolojik rejimi üzerinde doğrudan etkili olan bir akarsu konumundadır. Meriç Havzası'nın yıllık toplam akışı yaklaşık 8 milyar m³ olup, bu akışın büyük bir kısmı Bulgaristan kaynaklıdır. Bu durum, Tunca Nehri'nin akım rejiminin büyük ölçüde sınır ötesi hidrolojik süreçler tarafından kontrol edildiğini göstermektedir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Edirne hidrolojik durumu (DSİ, 2022)

Tunca Havzası genel olarak geniş düzlükler ve alçak tepelerden oluşan sade bir topoğrafyaya sahiptir. Havzanın ortalama yükseltisi 60–630 m arasında değişmekte olup, Edirne ili deniz seviyesinden ortalama 41 m yükseklikte yer almaktadır. Nehir, düşük eğimli yatağı nedeniyle yer yer menderesler çizerek akmakta ve bu durum özellikle taşkın riskini artırmaktadır. Tunca Nehri'nin yatak eğiminin düşük olması ve akım hızının sınırlı olması, tarımsal sulama açısından elverişli koşullar oluştururken, aynı zamanda kirleticilerin taşınımı ve birikimi açısından da hassas bir yapı ortaya koymaktadır.

Tunca Havzası'nda yaygın olarak kireçsiz kahverengi topraklar, kahverengi orman toprakları ve alüvyal topraklar bulunmaktadır. Alüvyal topraklar özellikle nehir yatağı ve çevresindeki taşkın ovalarında yoğunlaşmakta olup, yüksek tarımsal verim potansiyeline sahiptir. Ancak bu toprakların geçirgen yapısı, yüzeysel su ile toprak–su etkileşimini artırmakta ve sulama suyu kalitesindeki değişimlerin tarımsal üretime doğrudan yansımasına neden olmaktadır.

İklim açısından Tunca Havzası, Akdeniz ve karasal iklim arasında geçiş özelliği göstermektedir. Kışlar soğuk ve yağışlı, yazlar ise sıcak ve kurak geçmektedir. Yaz aylarında yağışların azalmasıyla birlikte nehir akımlarında belirgin düşüşler gözlenmekte, bu durum hidrolojik kuraklık koşullarının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Düşük akım dönemlerinde

nehrin seyreltme kapasitesinin azalması, su kalitesi parametrelerinde konsantrasyon artışlarına yol açabilmektedir.

Tunca Nehri'nin Suakacağı–Edirne kesimi, hem sınır aşan su niteliği taşıması hem de tarımsal sulama açısından yoğun kullanılan alanları temsil etmesi nedeniyle hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkilerin incelenmesi açısından temsil edici bir çalışma alanı niteliği taşımaktadır.

Ergene Nehri, Türkiye'nin kuzeybatısında Trakya Bölgesi'nde yer alan Meriç–Ergene Havzası'nın en önemli yüzeysel su bileşenlerinden biridir. Havza; doğuda İstanbul, batıda Bulgaristan ve Yunanistan sınırları ile çevrili olup Edirne, Kırklareli, Tekirdağ, İstanbul ve Çanakkale illerinin bir bölümünü kapsamaktadır. Toplam havza alanı yaklaşık 14.486 km² olan Meriç–Ergene Havzası, Türkiye'nin en yoğun tarımsal ve sanayi faaliyetlerinin yürütüldüğü havzalarından biridir.

Ergene Nehri, Yıldız (Istranca) Dağları'ndan doğmakta ve Trakya'nın iç kesimlerinden geçerek Uzunköprü ilçesi yakınlarında Meriç Nehri ile birleşmektedir. Nehir, Çorlu Deresi, Lüleburgaz Deresi, Hayrabolu Deresi, Babaeski Deresi ve Şeytan Deresi gibi çok sayıda yan kol tarafından beslenmektedir. Bu hidrografik yapı, havzanın drenaj ağının gelişmiş olmasına karşın, düşük eğimli topoğrafya nedeniyle akım hızlarının sınırlı kalmasına neden olmaktadır.

Meriç–Ergene Havzası genel olarak düşük eğimli, geniş ovalarla karakterize edilen bir topoğrafyaya sahiptir. Ergene Ovası, İpsala Ovası ve Tunca Ovası havzanın en önemli tarımsal alanlarını oluşturmaktadır. Bu ovalar, alüvyal toprakların yaygın olduğu, tarımsal üretim açısından yüksek potansiyele sahip alanlardır. Ancak uzun yıllardır uygulanan yoğun tarımsal faaliyetler ve monokültür tarım, toprakların organik madde içeriğinin azalmasına ve tarımsal girdilere bağımlılığın artmasına neden olmuştur.

Havza iklimi ağırlıklı olarak karasal özellik göstermekte olup, yaz ayları sıcak ve kurak, kış ayları soğuk ve yağışlı geçmektedir. Yaz dönemlerinde yağışların azalması ve buharlaşmanın artması, Ergene Nehri'nde düşük akım koşullarının oluşmasına yol açmaktadır. Bu durum, hidrolojik kuraklık etkilerinin belirginleşmesine ve nehirdeki seyreltme kapasitesinin ciddi şekilde azalmasına neden olmaktadır.

Ergene Nehri, havza genelinde yoğun sanayi ve yerleşim baskısı altında bulunan bir akarsudur. Özellikle Çorlu, Çerkezköy ve Lüleburgaz çevresinde gelişen sanayi faaliyetleri

sonucunda evsel ve endüstriyel atıksu deşarjları nehir suyu kalitesini ciddi biçimde olumsuz etkilemiştir. Yapılan izleme çalışmaları, Ergene Nehri'nin birçok kesiminde Yerüstü Su Kalitesi Yönetmeliği'ne göre IV. sınıf (çok kirlenmiş su) özelliği gösterdiğini ortaya koymaktadır. Yaz aylarında düşük akım koşulları altında bu kirlilik etkileri daha da belirgin hâle gelmektedir.

Ergene Nehri'nin Uzunköprü kesimi, nehrin Meriç Nehri ile birleşimine yakın konumu, yoğun tarımsal sulama faaliyetlerinin yürütüldüğü alanları temsil etmesi ve hidrolojik kuraklık etkilerinin açık biçimde gözlemlenebilmesi nedeniyle çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu kesim, hidrolojik kuraklık–su kalitesi etkileşiminin yanı sıra sınır aşan su yönetimi sorunlarının değerlendirilmesi açısından da kritik ve temsil edici bir örnek alan oluşturmaktadır.

Meriç Havzası kapsamında, Ergene Nehri'nin Uzunköprü kesimi ile Tunca Nehri'nin Suakacağı kesimi incelenmiştir. Trakya Bölgesi'nde yer alan Meriç–Ergene Havzası, düşük eğimli topoğrafyası, geniş alüvyal ovaları ve sınır aşan hidrografik yapısıyla öne çıkmaktadır. Ergene Nehri, yoğun sanayi, yerleşim ve tarımsal faaliyetlerin etkisi altında olup özellikle yaz aylarında düşük akım koşulları sergilemektedir. Bu durum, seyreltme kapasitesinin azalmasına ve su kalitesi parametrelerinde belirgin bozulmalara neden olmaktadır (Kahraman ve Özkul, 2018; Kantarcı, 2005). Uzunköprü kesimi, Ergene Nehri'nin Meriç Nehri ile birleşimine yakın konumu nedeniyle, hidrolojik kuraklık–su kalitesi etkileşiminin ve sınır aşan su yönetimi sorunlarının değerlendirilmesi açısından kritik bir alan niteliği taşımaktadır. Tunca Nehri ise Bulgaristan kaynaklı olup, akım rejimi büyük ölçüde sınır aşan hidrolojik süreçler tarafından kontrol edilmektedir (Yakar, 2013).

3.2. Yöntem

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı akarsu havzalarında hidrolojik kuraklık ile tarımsal sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin belirlenmesi amacıyla Akım Kuraklık İndeksi (SDI), Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR), Sodyum Yüzdesi (%Na) ve Kanada Su Kalitesi İndeksi (CCME WQI) kullanılmıştır. Hidrolojik kuraklık koşulları SDI ile değerlendirilirken, sulama suyu kalitesi SAR, %Na ve CCME WQI indeksleri kullanılarak belirlenmiştir. İlişki analizlerinde, aylık SDI değerleri ile aynı aylara ait su kalitesi indeksleri eşleştirilerek değerlendirilmiştir. İstatistiksel analizler kapsamında tanımlayıcı istatistikler, Shapiro–Wilk normallik testi, Pearson ve Spearman korelasyon analizleri, Mann–Whitney U testi ile Mevsimsel Mann–Kendall trend analizi ve Sen Eğimi yöntemi uygulanmıştır.

3.2.1. Su kalitesi ve kuraklık indekslerinin hesaplanması

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı hidrolojik özelliklere sahip Meriç, Susurluk, Sakarya, Yeşilırmak ve Gediz havzalarında bulunan toplam sekiz akım gözlem istasyonuna ait su kalitesi ve akım verileri kullanılmıştır. Çalışmanın temel amacı, hidrolojik kuraklık koşulları ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin ortaya konulmasıdır. Bu kapsamda hidrolojik kuraklığın belirlenmesinde Akım Kuraklık İndeksi (Streamflow Drought Index-SDI), sulama suyu kalitesinin değerlendirilmesinde ise Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR), Sodyum Yüzdesi (%Na) ve Kanada Su Kalitesi İndeksi (Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index-CCME WQI) kullanılmıştır. İndekslerin aynı zaman diliminde karşılaştırılabilmesi amacıyla aylık SDI değerleri ile aynı aylara ait su kalitesi indeksleri eşleştirilerek değerlendirilmiştir. Hesaplanan SDI ve CCME WQI değerlerinin zamansal eğilimlerini belirlemek amacıyla Mevsimsel Mann–Kendall trend analizi uygulanmış, trendlerin yönü ve büyüklüğü ise Sen Eğimi yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir.

Su kalitesi verileri, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından yayımlanan Su Kalitesi Gözlem Yıllıkları (1983–1984)'ndan elde edilmiştir. Hidrolojik kuraklığın belirlenmesinde kullanılan akım verileri ise Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü (DSİ) tarafından yayımlanan Akım Gözlem Yıllıkları ile Elektrik İşleri Etüt İdaresi (EİE) Akım Gözlem Yıllıkları'ndan temin edilmiştir. SDI hesaplamalarında uluslararası uygulamalarla uyumlu olarak 1970–2000 yılları arasındaki otuz yıllık akım kayıtları referans dönem olarak kullanılmıştır. Bu referans dönem, havzalardaki doğal hidrolojik değişkenliğin temsil edilmesi ve son yıllarda artan baraj yapımı, yoğun sulama faaliyetleri ve diğer antropojenik etkilerin sonuçları maskelemesini en aza indirmek amacıyla tercih edilmiştir.

Kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin belirlenmesinde yalnızca her iki veri grubunun ortak olarak bulunduğu aylara ait gözlemler değerlendirilmiştir. Bu nedenle, 1983–1984 yıllarına ait aylık SDI sonuçları ile aynı aylarda ölçülen su kalitesi parametrelerinden hesaplanan SAR, %Na ve CCME WQI değerleri istatistiksel analizlerde birlikte kullanılmıştır. Böylece hidrolojik kuraklık koşulları ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişki aynı zaman ölçeğinde incelenmiştir.

CCME WQI hesaplamalarında pH, elektriksel iletkenlik (EC), çözünmüş oksijen (DO), fosfat (PO_4^{3-}) ve klorür (Cl^-) parametrelerinden yararlanılmıştır. SAR ve %Na hesaplamalarında ise sodyum (Na^+), potasyum (K^+), kalsiyum (Ca^{2+}) ve magnezyum (Mg^{2+})

iyon konsantrasyonları kullanılmıştır. Tüm su kalitesi analizleri Devlet Su İşleri ve Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından standart izleme programları kapsamında gerçekleştirilmiş olup analizler APHA (American Public Health Association) tarafından önerilen standart yöntemlere göre akredite laboratuvarlarda yürütülmüştür. Bu durum elde edilen ölçümlerin güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini artırmaktadır.

CCME WQI hesaplamasında kullanılan hedef değerler esas olarak FAO'nun sulama suyu kalite kriterlerine dayandırılmıştır. FAO rehberinde sınır değeri bulunmayan çözünmüş oksijen (DO) ve fosfat (PO_4^{3-}) parametreleri için ise Canadian Water Quality Guidelines (CCME, 2001) tarafından önerilen eşik değerler esas alınmıştır. Böylece indeks hesaplamalarında kullanılan tüm parametreler için ortak ve tutarlı bir değerlendirme sistemi oluşturulmuştur. Hesaplamalarda kullanılan parametreler, hedef değerler ve yararlanılan kaynaklar Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1. CCME WQI hesaplamasında kullanılan parametreler, hedef değerler ve kaynaklar

Parametre	**Birim**	**Hedef değer**	**Kaynak**
pH	-	6,5–8,4	Ayers ve Westcot (1985)
EC	µS/cm	≤700	Ayers ve Westcot (1985)
DO	mg/L	≥5,5	CCME (2001)
PO_4	mg/L	≤0,1	CCME (2001)
Cl	mg/L	<140 (duyarlı bitkiler) 140–350 (orta duyarlı bitkiler) 350–700 (orta toleranslı bitkiler)	Ayers ve Westcot (1985)

Not: CCME WQI hesaplamalarında elektriksel iletkenlik (EC) için 700 µS/cm değeri, sulama suyu kullanımında kısıtlama gerektirmeyen üst sınır hedef değeri olarak kabul edilmiştir.

3.2.1.1. Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR)

SAR, suyun sulamaya uygunluğunu anlamak için önemli bir kriterdir, çünkü bitkiler için alkali/sodyum tehdidinin bir parmak izidir (Richards, 1954; Todd, 1959). 18'den yüksek sulama suyunun SAR değerleri, toprak yapısı ve bitki gelişimi üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir (Richard, 1954). Bu durum, killi toprakların büzülmesi ve şişmesi nedeniyle geçirgenlik sorunları olarak görülecektir (Saleh vd., 1999). SAR, suda bulunan başlıca katyonların bağıl oranlarına göre hesaplanmıştır; burada iyon miktarları meq l-1 cinsinden aşağıda verilen F.1'de gösterilmiştir.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+}Mg^{2+}}{2}}} \quad \text{(F.1)}$$

3.2.1.2. Sodyum Yüzdesi (%Na)

Sudaki sodyum katyonu, toprağın geçirgenliğini azaltır. Bu, sulama suyunda istenmeyen bir durumdur.Wilcox'a (1955) göre, %60'a kadar olan Na değerleri, suyun sulamaya uygunluğunu belirler. Suların %Na değerleri, F.2 kullanılarak hesaplanmıştır; burada konsantrasyonlar meq l^{-1} cinsinden ifade edilmiştir (Wilcox, 1955).

$$\%Na = \frac{Na^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100 \quad \text{(F.2)}$$

Tablo 3.2. Sodyum Yüzdesi (%Na) sınıflandırılması

%Na Aralığı	Sodyum Tehlikesi
0-20	Çok Düşük
20-40	Düşük
40-60	Orta
60-80	Yüksek
>80	Çok Yüksek

3.2.1.3. Kanada Su Kalite İndeksi (CCME WQI)

Kanada Su Kalitesi İndeksi; Kanada Çevre Bakanlığı tarafından, tüm Kanada'daki eyaletler arasında kullanılması amacıyla geliştirilmiştir. Literatürde Kanada Çevre Bakanları Meclisi (Canadian Council of Ministers of the Environment – CCME) indeksi olarak da yer almaktadır (CCME, 2001).

İndeksin hesaplama mantığı parametrelerin örneklendirme sıklığını, başarısız parametrelerin sıklığını ve parametrelerin limit değerlerden sapma oranlarını baz almaktadır.

Yapılacak çalışmalar lokasyona ve çevre koşullarına göre değişeceği için özel parametreler ya da zaman kavramı tanımlanmamaktadır. En az dört parametreye ait en az dört ölçüm değeri kullanılarak hesaplanabilir (Bilgin, 2018).

Modelin çalışmasında, Faktör 1 (kapsam: scope), Faktör 2 (frekans: frequency) ve Faktör 3 (genişlik: amplitude) birer vektör olarak kabul edilip nihai olarak bu üç vektörün bileşkesi hesaplanmaktadır.

İndeksin hesaplanmasında kullanılan üç faktör şunlardır (CCME, 2001):

- Faktör 1 (F_1): Kapsam (scope) olarak adlandırılır. Mevzuatta ya da yasal düzenlemede verilen limit değeri aşan (geçersiz) parametrelerin toplam parametrelere göre yüzdesidir F.3. Örneğin indeksi hesaplamak için on farklı parametre kullanılıyor ve her bir parametre için de beşer adet deney yapılıyor olsun. Kaç adet deney sonucunun sınır değeri aştığına bakılmaksızın, eğer bir parametre kapsamında yapılacak beş deneyden biri bile sınırı sağlamıyorsa o parametre geçersiz sayılmaktadır.

$$F_1 = \frac{Başarısız\ parametre\ sayısı}{Toplam\ parametre\ sayısı} \times 100 \quad \text{(F.3)}$$

- Faktör 2 (F_2): Frekans (frequency) olarak adlandırılır. Hangi parametre olduğuna bakılmaksızın, toplamda kaç deneyin kabul edilen sınır değerlerin altında ya da üzerinde olduğunun toplam deney sayısına göre yüzdesidir F.4. Yukarıdaki örnekte, parametre özelinde düşünmeden, toplam on parametre için beşer deney yapılıyorsa elli deney içerisinde kaç sonucun yasal limitleri sağlamadığının göstergesidir.

$$F_2 = \frac{Başarısız\ deney\ sayısı}{Toplam\ deney\ sayısı} \times 100 \quad \text{(F.4)}$$

- Faktör 3 (F_3): Genişlik (amplitude) olarak adlandırılır. Sınır değerlerin ne oranda saptığının miktarıdır. Üç aşamada hesaplanır.

  İlk aşamada koşullu olarak üç duruma göre sapma değerleri hesaplanır:

  - Parametre değeri, limit değerden fazla olamazsa F.5'e göre hesaplanır. Örneğin bir X parametresinin ölçülen değerinin 50 mg/L'nin üzerinde olmaması isteniyorsa ve deney sonucunda 60 mg/L bulunmuşsa, sapma değeri (60/50)-1 şeklinde hesaplanacaktır.

$$Sapma_i = \left(\frac{Başarısız\ deney\ değeri}{Hedef\ değeri}\right) - 1 \quad \text{(F.5)}$$

- Parametre değeri, limit değerden az olamazsa F.6'ya göre hesaplanır. Örneğin bir Y parametresinin ölçülen değerinin 50 mg/L'nin üzerinde olması isteniyorsa ve deney sonucunda 40 mg/L bulunmuşsa, sapma değeri (50/40)-1 şeklinde hesaplanacaktır.

$$Sapma_i = \frac{Hedef\ değeri}{Başarısız\ deney\ değeri} - 1 \quad \text{(F.6)}$$

- Limit değer sıfır ise F.7 geçerlidir. Örneğin bir Z parametresinin ölçülen değerinin sıfır olması yani ortamda hiç olmaması isteniyorsa ve deney sonucunda 10 mg/L bulunmuşsa, sapma değeri 10'a eşittir.

$$Sapma_i = Başarısız\ deney\ değeri_i \quad \text{(F.7)}$$

İkinci aşamada, ilk basamakta elde edilen sapma değerlerinin toplamının toplam deney sayısına (limit değerleri sağlayıp sağlamadığına bakılmaksızın) oranı hesaplanır F.8. Bu değere normalleştirilmiş sapmalar toplamı (normalized sum of excursions – nse) denir.

$$n_{se} = \frac{\sum_{i=0}^{n} sapma_i}{Toplam\ deney\ sayısı} \quad \text{(F.8)}$$

Üçüncü aşamada ise, nse değerlerinin hedef değerlerden 0'dan 100 aralığında ölçeklendirilerek F_3'ün hesaplanması sağlanır F.9.

$$F_3 = \frac{n_{se}}{0{,}01 n_{se} + 0{,}01} \quad \text{(F.9)}$$

Nihai olarak, elde edilen F_1, F_2 ve F_3 değerleri kullanılarak su kalitesi indeksinin hesaplanması sağlanır F.10.

$$CCME\ WQI = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1{,}732} \right) \quad \text{(F.10)}$$

Burada kullanılan 1,732 faktörü sayesinde elde edilecek sonucun 100 değerini aşmaması sağlanır F.11.

$$\sqrt{100^2 + 100^2 + 100^2} = \sqrt{30000} = 173{,}2 \quad \text{(F.11)}$$

Elde edilen indeks skoru, Tablo 3.3'e göre sınıflandırılarak su kalitesi belirlenir.

Tablo 3.3. CCME WQI yöntemi için su kalitesi değerleri ve kalite sınıfları (CCME, 2001)

CCME WQI	Kalite Sınıfı
95-100	Mükemmel
80-94	İyi
65-79	Orta
45-64	Zayıf
0-44	Kötü

Kanada Su Kalitesi İndeksi, spesifik parametrelere ihtiyaç duymaması bakımından çok avantajlıdır. Hedef parametrelerin seçiminde büyük esneklik ve kolaylık sağlar. Farklı yasal mevzuatlarla ve sınırlamalarla (çok ütopik değerler için bile) kullanılabilir. Dünya'nın pek çok farklı ülkesinde kullanılmaktadır. Ortaya koyduğu sonuçlar bakımından da çok anlaşılırdır. Diğer bir yandan, su kalitesinin belirlenmesinde bazen uygun parametrelerin seçilmemesi, kalitenin kısmen belirlenebilmesi, sonuçların indeks formülüne çok duyarlı olması, sınır değerler ya da parametre seçimiyle kolaylıkla manipüle edilebilirliği, yapılan çalışmaların yalnızca o lokasyonu temsil etmesi ve Dünya'daki diğer örneklerle kıyaslamada zorluk çıkarması, parametreler arasında önem sıralaması yapmadan her birine eşit ağırlık vermesi gibi sebepler bu indeksin dezavantajlarıdır (Bilgin, 2018; Tyagi vd., 2013).

3.2.1.4. Akım Kuraklık İndeksi (SDI)

Nalbantis tarafından geliştirilen bu yöntem ile bir çalışma bölgesindeki hidrolojik kuraklık incelenebilmektedir. Akım Kuraklık İndeksi (Streamflow Drought Index-SDI) aylık akım verileri ($Q_{i,j}$) kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada i, hidrolojik yılı, j ise Ekim-Eylül arasındaki zaman olarak tanımlanan hidrolojik yıl içerisindeki ayı temsil etmektedir. Kümülatif akım hacmi,

$$V_{i,j} = Q_{i,j} \,,\, \sum_{kj=3}^{3} \qquad k=1,2,3,4 \quad \text{(F.12)}$$

$$V_{i,j} = Q_{i,j} \,.\, \sum_{kj=6(k-1)}^{6} \quad k=1,2 \quad \text{(F.13)}$$

$$V_{i,j} = Q_{i,j} \,.\, \sum_{j=1}^{12} \quad \text{(F.14)}$$

şeklinde hesaplanır. F.12, F.13, F.14'de sırasıyla 3, 6 ve 12 aylık kuraklık indis değerleri hesaplanır.

Eşitliklerdeki k, referans periyodu ifade eder ve F.12'de k=1 Ekim-Aralık (SDI-3 Ekim), k=2 Ocak-Mart (SDI-3 Ocak), k=3 Nisan-Haziran (SDI-3 Nisan), k=4 ise Temmuz-

Eylül (SDI-3 Temmuz) dönemlerini temsil eder. F.13'de k=1 ve k=2 sırasıyla ilk 6 ay (SDI-6 Ekim) ve son 6 aylık (SDI-6 Nisan) periyodları, F.14 ise yıllık kuraklık indis değerini (SDI-12) ifade eder.

Referans periyot k ve i'inci hidrolojik yıl için SDI aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$SDI_{j,k} = \frac{V_{i,k} - V_k}{S_k} \quad \text{(F.15)}$$

Burada, V_k ve S_k sırasıyla kümülatif akım hacimlerinin ortalamasını ve standart sapmasını temsil eder. Tablo 3.4'te SDI değerleri, kuraklık ve nemlilik şiddetlerine göre sekiz sınıfta değerlendirilmektedir. SDI ≤ 0 değerleri kurak koşulları, SDI > 0 değerleri ise nemli koşulları ifade etmekte; negatif ve pozitif değerlerin büyüklüğü sırasıyla kuraklık ve nemlilik şiddetini göstermektedir (Hong vd., 2014). Bu çalışmada SDI değerleri bu sınıflandırma dikkate alınarak değerlendirilmiştir.

Tablo 3.4. SDI değerlerinin sınıflandırılması (Hong vd., 2014)

SDI Değeri	**Sınıflandırma**
SDI ≤-2	Aşırı Kurak (AK)
-2< SDI ≤-1.5	Şiddetli Kurak (ŞK)
-1.5< SDI ≤-1	Orta Kurak (OK)
-1< SDI ≤0	Hafif Kurak (HK)
0< SDI ≤1	Hafif Nemli (HN)
1< SDI ≤1.5	Orta Nemli (ON)
1.5< SDI ≤2	Şiddetli Nemli (ŞN)
SDI >2	Aşırı Nemli (AN)

3.2.2. İstatistiksel analizler

Su kalitesi verilerinin her ay için mevcut olmaması nedeniyle, SDI ile su kalitesi indekslerinin ilişkisinin değerlendirilmesinde yalnızca her iki veri setinin de mevcut olduğu ortak aylar kullanılmıştır. Bu kapsamda, su kalitesi gözlemi bulunan aylara karşılık gelen SDI değerleri eşleştirilerek istatistiksel analizlerde kullanılmıştır.

Bu çalışmada; normallik testi, korelasyon analizi, Mann-Whitney U testi, sağlamlık testi ve güven aralığı belirlenmiştir.

3.2.2.1. Normallik testi

Su kalitesi parametreleri ve SDI değerlerinin dağılım özelliklerini özetlemek için ortalama, standart sapma, medyan, minimum ve maksimum değerler hesaplanmıştır. İlişki analizlerinde kullanılacak uygun istatistiksel yöntemin belirlenmesi için tüm değişkenlere Shapiro-Wilk normallik testi uygulanmıştır. Normallik değerlendirmesinde anlamlılık düzeyi olarak $\alpha=0.05$ kabul edilmiştir.

Shapiro-Wilk Testi: Shapiro-Wilk testi, bir veri setinin normal dağılıma uyup uymadığını test eden istatistiksel bir hipotez testidir. Özellikle küçük ve orta ölçekli örneklemler ($n < 50$-100) için en güçlü test kabul edilir (Mishra vd., 2019).

- **Sıfır Hipotezi (H_0):** "Veri seti normal dağılıma uyar."
- **Alternatif Hipotez (H_1):** "Veri seti normal dağılıma uymaz."

Test, verilerin sıralı istatistikleri ile normal dağılımın beklenen değerleri arasındaki korelasyonu ölçer. Sonuç olarak bir W istatistiği ve bir p-değeri üretir.

Korelasyon analizinde kullanılacak uygun istatistiksel yöntemin belirlenmesi için öncelikle tüm değişkenlerin (SDI değerleri ve su kalitesi parametreleri) normal dağılıp dağılmadığı kontrol edilmiştir. Normallik varsayımının test edilmesinde, özellikle küçük ve orta ölçekli örneklemler için gücü yüksek olan Shapiro-Wilk testi kullanılmıştır. Normallik değerlendirmesinde anlamlılık düzeyi olarak $\alpha=0.05$ kabul edilmiştir. Normallik varsayımının sağlandığı parametreler arasındaki ilişkileri incelemek için Pearson Korelasyon Katsayısı, normallik varsayımının sağlanmadığı durumlarda ise non-parametrik bir test olan Spearman Korelasyon Katsayısı kullanılmıştır.

3.2.2.2. Korelasyon analizi

Hidrolojik kuraklık ile su kalitesi parametreleri arasındaki ilişkinin yönünü ve şiddetini belirlemek için korelasyon analizi yapılmıştır. Normallik varsayımını sağlayan parametre çiftleri için Pearson Korelasyon Katsayısı (r), sağlamayanlar için ise Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı (ρ) hesaplanmıştır. Korelasyonların istatistiksel anlamlılığı $\alpha=0.05$ düzeyinde test edilmiştir.

İlişki analizlerinde kullanılacak uygun istatistiksel yöntemi belirlemek amacıyla tüm değişkenlere Shapiro-Wilk normallik testi uygulanmıştır. Normallik varsayımının sağlandığı

parametre çiftleri için Pearson Korelasyon Katsayısı (r), sağlanmadığı durumlar için ise non-parametrik bir test olan Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı (ρ) kullanılmıştır. Korelasyonların istatistiksel anlamlılığı α=0.05 düzeyinde değerlendirilmiştir (Mishra vd., 2019).

3.2.2.3. Mann-Whitney U testi

Bu tez çalışmasında su kalitesi verilerinin analizinde Mann-Whitney U testi tercih edilmiştir. Çünkü su kalitesi parametreleri, özellikle kirletici konsantrasyonları, genellikle sağa çarpık dağılım göstermekte ve nadiren ortaya çıkan yüksek değerler nedeniyle normal dağılım varsayımı çoğu zaman sağlanamamaktadır. Ayrıca, kurak dönem ve normal dönem gibi farklı hidrometeorolojik koşullarda elde edilen verilerde varyanslar arasında belirgin farklılıklar oluşabilmekte, bu da parametrik testlerin gerektirdiği varyans homojenliği varsayımını ihlal etmektedir. Bu nedenlerle, dağılım varsayımlarına bağlı olmayan, non-parametrik bir yöntem olan Mann-Whitney U testi kullanılmıştır (Zar, 2010; Gibbons ve Chakraborti, 2011). Kurak ve normal/yağışlı dönemler arasındaki su kalitesi parametrelerindeki farklılıkların istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını test etmek için, öncelikle her bir parametre için her iki dönem grubuna ayrı ayrı Shapiro-Wilk normallik testi uygulanmıştır. Normallik varsayımının sağlanmadığı parametreler için ise non-parametrik bir test olan Mann-Whitney U testi uygulanmıştır. Tüm testlerde anlamlılık düzeyi α=0.05 olarak kabul edilmiştir.

3.2.2.4. Mevsimsel Mann–Kendall (SMK) trend analizi

Bu çalışmada, seçilen istasyonlara ait Akım Kuraklık İndeksi (SDI) ve Kanada Su Kalitesi İndeksi (CCME WQI) değerlerinin zamansal eğilimlerini belirlemek amacıyla Mevsimsel Mann–Kendall (SMK) trend analizi uygulanmıştır. Mevsimsel Mann–Kendall testi, klasik Mann–Kendall testinin mevsimsel etkileri dikkate alacak şekilde geliştirilmiş parametrik olmayan bir eğilim analizidir. Özellikle aylık veya mevsimsel gözlemlerden oluşan hidrolojik ve çevresel veri serilerinde, mevsimselliğin oluşturabileceği değişkenliği kontrol ederek uzun dönemli eğilimlerin güvenilir biçimde belirlenmesini sağlamaktadır (Hirsch vd., 1982).

Mevsimsel Mann–Kendall testi, verilerin belirli bir dağılıma sahip olmasını gerektirmemesi, eksik gözlemlerden daha az etkilenmesi ve aykırı değerlere karşı dayanıklı olması nedeniyle hidrolojik ve su kalitesi çalışmalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu özellikleri sayesinde özellikle akım, yağış ve su kalitesi parametreleri gibi doğal değişkenliğin yüksek olduğu veri setlerinde güvenilir sonuçlar vermektedir (Hirsch vd., 1982; Sen, 1968).

Bu testte sıfır hipotezi (H_0), incelenen zaman serisinde istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim bulunmadığını; alternatif hipotez (H_1) ise zaman serisinde artan veya azalan yönde anlamlı bir eğilim bulunduğunu ifade etmektedir. Eğilimin istatistiksel anlamlılığı $\alpha = 0{,}05$ anlamlılık düzeyinde değerlendirilmiş olup $p < 0{,}05$ olması durumunda eğilimin istatistiksel olarak anlamlı olduğu kabul edilmiştir.

Mevsimsel Mann–Kendall analizinde eğilimin yönü Kendall'ın tau (τ) katsayısı ile belirlenmektedir. Tau katsayısının pozitif olması zaman içerisinde artan yönlü, negatif olması ise azalan yönlü bir eğilimi göstermektedir. Tau katsayısının mutlak değerinin büyümesi ise eğilimin gücünün arttığını ifade etmektedir.

Bu çalışmada Mevsimsel Mann–Kendall trend analizi yalnızca SDI ve CCME WQI zaman serilerine uygulanmıştır. Analizler, Python programlama dili (v3.11) kullanılarak Google Colaboratory ortamında gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan Kendall'ın tau katsayıları ile eğilimlerin yönü belirlenmiş, eğilimlerin büyüklüğü ise Sen Eğimİ yöntemi kullanılarak değerlendirilmiştir.

3.2.2.5. Sen Eğimi yöntemi (Sen's Slope)

Sen Eğimİ yöntemi , zaman serilerindeki doğrusal eğilimin yönünü ve büyüklüğünü belirlemek amacıyla kullanılan parametrik olmayan bir eğim tahmin yöntemidir. Bu yöntem, veri serisindeki tüm gözlem çiftleri arasındaki eğim değerlerinin hesaplanması ve bu değerlerin medyanının alınması esasına dayanmaktadır (Sen, 1968). Parametrik varsayımlar gerektirmemesi ve aykırı değerlere karşı dayanıklı olması nedeniyle hidrolojik ve çevresel zaman serilerinin analizinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sen Eğim Yöntemi'nde her bir gözlem çifti için eğim değeri aşağıdaki F.16 yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$Q_{\text{i}} = \frac{x_j - x_k}{j - k} \quad (j > k) \tag{F.16}$$

Burada , her bir gözlem çifti için hesaplanan eğimi; gözlem değerlerini; *j,* ve *k,* ise gözlemlerin zaman sıralarını ifade etmektedir. Hesaplanan tüm eğim değerlerinin medyanı, zaman serisinin Sen Eğimi katsayısını oluşturmaktadır (Sen, 1968).

Bu çalışmada, Mevsimsel Mann–Kendall (SMK) trend analizi sonucunda belirlenen eğilimlerin büyüklüğünü belirlemek amacıyla Sen Eğimi yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen

pozitif eğim değerleri zaman içerisinde artan, negatif eğim değerleri ise azalan yönlü eğilimleri göstermektedir. Analizler, Python programlama dili (v3.11) kullanılarak Google Colaboratory ortamında gerçekleştirilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, farklı akarsu havzalarında hidrolojik kuraklık ile tarımsal sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkiler, Akım Kuraklık İndeksi (SDI) ile SAR, %Na ve CCME WQI indeksleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bulgular, istatistiksel testler ve korelasyon analizleri yoluyla analiz edilmiş ve sonuçlar literatür çerçevesinde yorumlanmıştır.

Bu bölümde elde edilen bulgular sırasıyla tanımlayıcı istatistikler, normallik testleri, Mann–Whitney U testi, korelasyon analizleri ile Mevsimsel Mann–Kendall (SMK) trend analizi ve Sen Eğimi yöntemi kapsamında sunulmuş, her bir analiz sonucu ilgili literatürle karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Tablo 4.1. İzleme istasyonları genelinde su kalitesi ve kuraklık endekslerinin tanımlayıcı istatistikleri

Akarsu/İstasyon	İndeks	Ortalama	Standart Sapma	Minimum	Maksimum	n
Gediz Havzası Alaşehir Çayı Baklacı	SAR	1.03	0.69	0.44	2.50	11
	%Na	22.50	10.99	9.31	42.47	11
	SDI	-0.10	0.52	-0.84	0.60	11
	CCME WQI	71.71	20.49	26.90	100.00	11
Yeşilırmak Havzası Yeşilırmak Nehri Durucasu HES	SAR	0.67	0.13	0.44	1.00	22
	%Na	17.55	2.98	12.83	26.88	22
	SDI	0.40	0.84	-0.57	2.27	22
	CCME WQI	82.84	17.67	52.10	100.00	22
Susurluk Havzası Simav Çayı Yahyaköy	SAR	0.63	0.20	0.47	1.16	9
	%Na	16.99	3.30	14.69	26.18	9
	SDI	0.31	0.77	-0.97	1.36	9
	CCME WQI	90.73	15.67	49.60	100.00	9
Sakarya Havzası Sakarya Nehri Yenice	SAR	1.22	0.09	1.00	1.36	22
	%Na	25.40	1.28	22.11	28.19	22
	SDI	0.07	0.97	-2.10	1.36	22
	CCME WQI	88.61	11.73	67.00	100.00	22
Sakarya Havzası Sakarya Nehri Doğançay	SAR	0.98	0.18	0.54	1.23	15
	%Na	22.29	2.76	15.39	25.95	15
	SDI	-0.10	0.69	-1.20	1.26	15
	CCME WQI	84.67	7.56	66.90	100.00	15

Tablo 4.1. İzleme istasyonları genelinde su kalitesi ve kuraklık endekslerinin tanımlayıcı istatistikleri (devamı)

Meriç Havzası Tunca Nehri Suakacağı	SAR	1.42	0.26	0.96	1.84	9
	%Na	33.47	8.70	21.22	44.10	9
	SDI	-0.02	0.65	-1.27	0.95	9
	CCME WQI	39.71	12.94	8.30	53.50	9
Yeşilırmak Havzası Yeşilırmak Nehri Sütlüce	SAR	0.49	0.11	0.37	0.85	22
	%Na	14.07	1.94	11.29	19.25	22
	SDI	0.53	0.62	-0.41	1.66	22
	CCME WQI	73.52	18.14	43.80	100.00	22
Meriç Havzası Ergene Nehri Uzunköprü	SAR	1.29	0.38	0.73	1.93	9
	%Na	27.02	5.03	20.03	35.93	9
	SDI	-0.23	0.61	-1.41	0.46	9
	CCME WQI	46.67	18.24	26.40	71.90	9

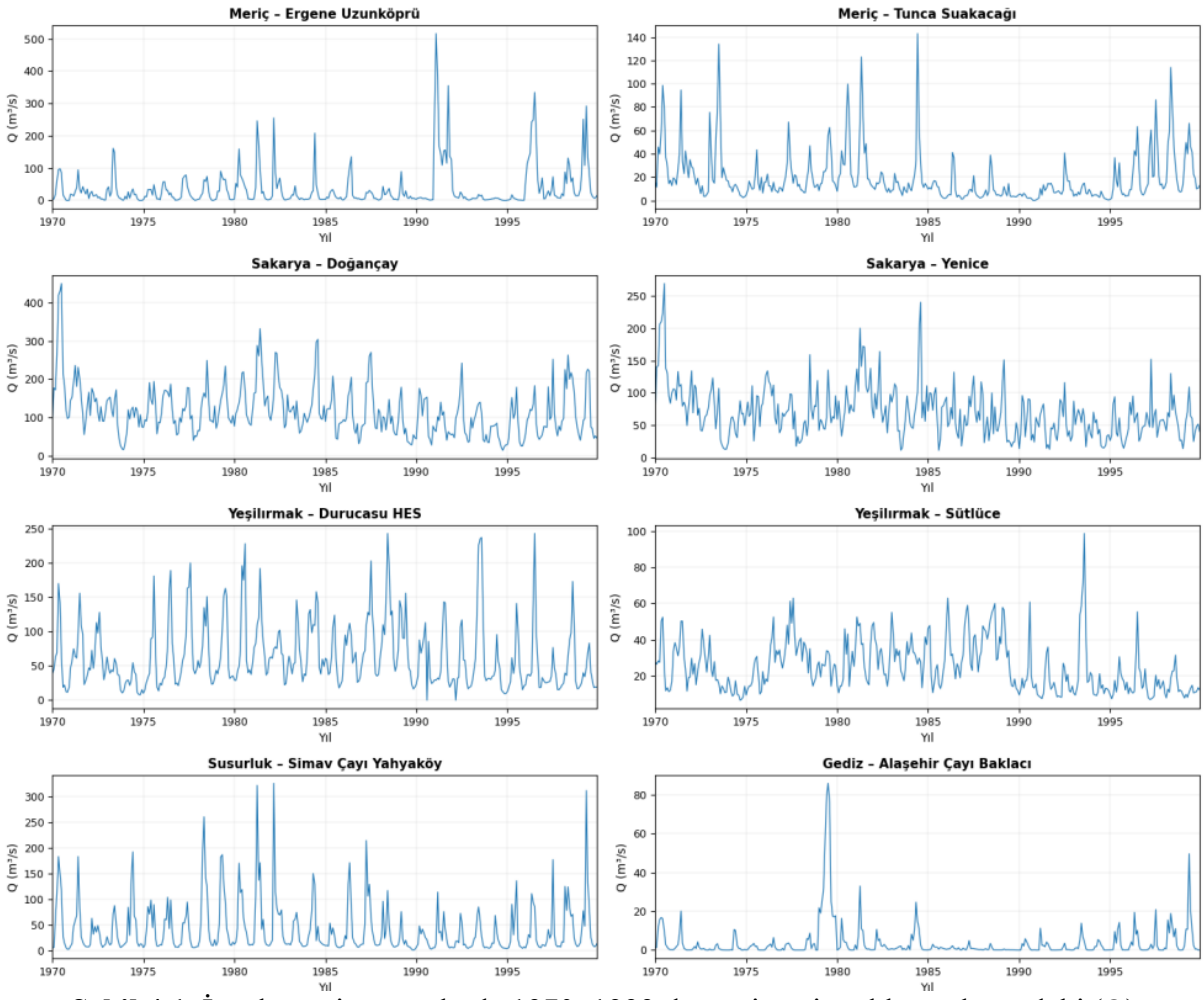
SAR sınıflandırmasına göre (Tablo 4.1), tüm istasyonlardaki ortalama SAR değerleri 0,98 ile 1,42 arasında değişmekte olup, düşük sodyum tehlikesi sınıfına (0-10) girmektedir. Bu, mevcut koşullar altında toprak geçirgenliğinde önemli bir sodyum riski olmadığını göstermektedir. Benzer şekilde, ortalama %Na değerleri istasyonlar genelinde %22,29 ile %33,47 arasında değişmekte olup, Tablo 3.2'deki sınıflandırmaya göre düşük sodyum tehlikesi sınıfına (%20-%40) karşılık gelmektedir. Bu sonuçlar, hidrolojik kuraklık olaylarının meydana gelmesine rağmen, çalışma havzaları genelinde sulama için sodyum tehlikesinin genel olarak düşük kaldığını göstermektedir.

Tablo 4.2. İncelenen istasyonlara ait 1970–1999 dönemindeki aylık ortalama debi (Q) istatistikleri

Akarsu/İstasyon	Ortalama Q (m^3/s)	Standart Sapma(m^3/s)	Minimum(m^3/s)	Maksimum(m^3/s)	n
Gediz Havzası Alaşehir Çayı Baklacı	3.86	9.53	0.00	85.90	360
Yeşilırmak Havzası Yeşilırmak Nehri Durucasu HES	64.46	48.27	0.00	243.00	360
Susurluk Havzası Simav Çayı Yahyaköy	41.84	51.06	1.37	325.00	360
Sakarya Havzası Sakarya Nehri Yenice	69.37	38.96	11.30	269.00	360
Sakarya Havzası Sakarya Nehri Doğançay	117.01	65.58	14.10	450.00	360
Meriç Havzası Tunca Nehri Suakacağı	19.20	21.54	0.041	143.00	360
Yeşilırmak Havzası Yeşilırmak Nehri Sütlüce	25.07	14.23	6.44	98.80	360
Meriç Havzası Ergene Nehri Uzunköprü	36.00	62.95	0.00	516.00	360

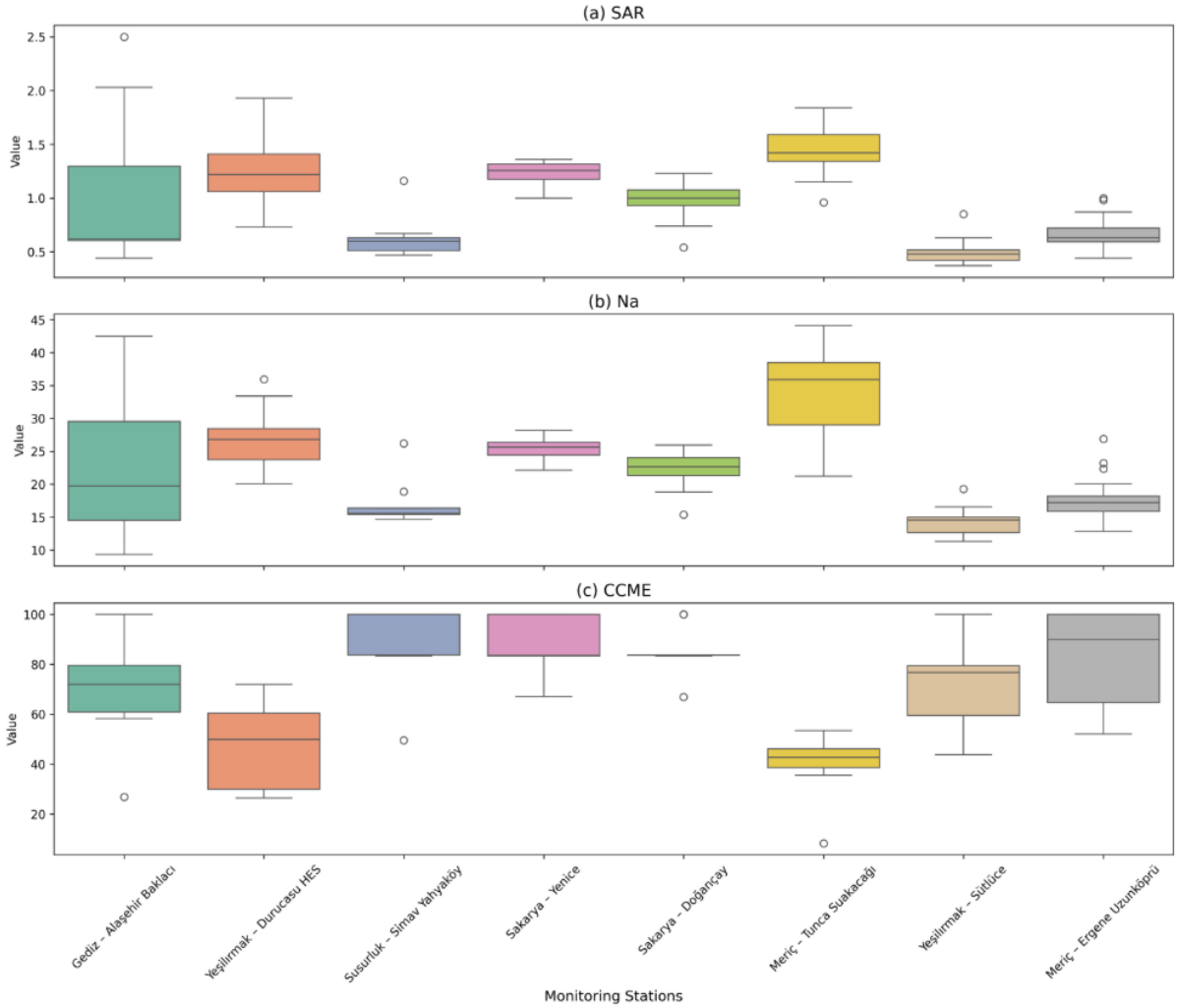
Not: Q değerleri 1970–1999 dönemindeki aylık ortalama debi değerlerinden hesaplanmıştır.

Tablo 4.2 incelendiğinde, 1970–1999 döneminde istasyonların aylık ortalama debi (Q) değerlerinin farklılık gösterdiği görülmektedir. Ortalama debi değerleri 3,86 –117,01 m^3/s arasında değişirken, maksimum debi değerleri 85,90–516,00 m^3/s arasında değişmiştir.



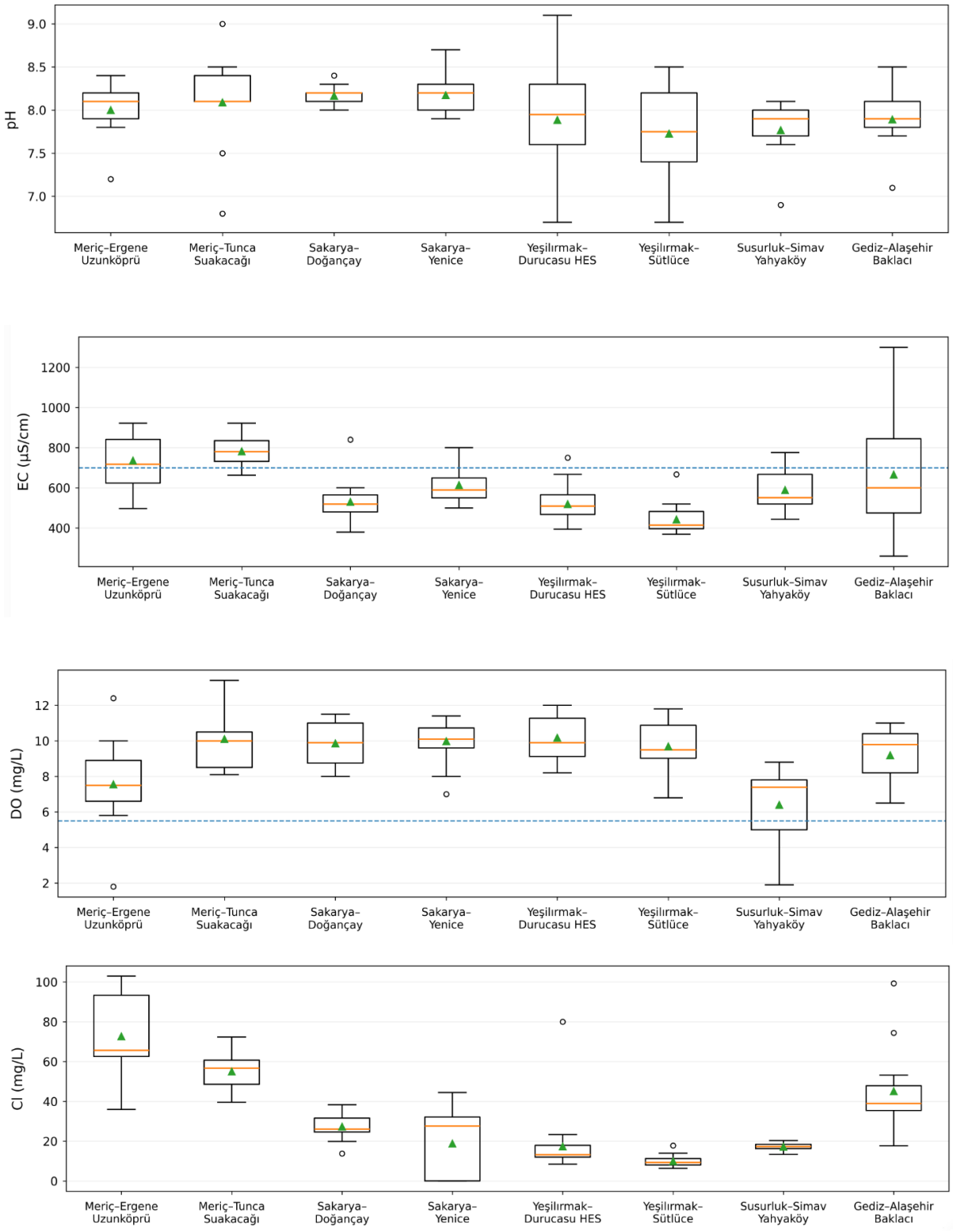
Şekil 4.1. İncelenen istasyonlarda 1970–1999 dönemine ait aylık ortalama debi (Q) değişimleri

Şekil 4.1'de görüldüğü üzere, 1970–1999 döneminde incelenen istasyonların aylık ortalama debi (Q) değerlerinde dönemsel ve istasyonlar arası belirgin farklılıklar bulunmaktadır. Debi değerlerinin değişim aralıkları, istasyonların hidrolojik özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Sakarya Nehri Doğançay istasyonunda dönem boyunca genel olarak daha yüksek debi değerleri gözlenirken, Gediz Havzası Alaşehir Çayı Baklacı istasyonunda debi değerlerinin daha düşük seviyelerde seyrettiği görülmektedir. Meriç Havzası Ergene Uzunköprü ve Tunca Suakacağı istasyonlarında ise dönem içerisinde belirli zamanlarda yüksek debi pikleri ortaya çıkmıştır. Yeşilırmak Havzası Durucasu HES ve Sütlüce istasyonlarında da aylık debi değerlerinin dönem boyunca değişkenlik gösterdiği ve bazı dönemlerde belirgin yükselmelerin meydana geldiği görülmektedir. Susurluk Havzası Simav Çayı Yahyaköy istasyonunda ise özellikle bazı yıllarda yüksek debi değerlerinin oluştuğu dikkat çekmektedir. Genel olarak, istasyonlarda gözlenen bu değişkenlik, uzun dönemli akım rejiminin zamansal farklılıklarını ortaya koymakta ve SDI hesaplamalarında kullanılan akım verilerinin dönem içerisindeki değişkenliğini göstermektedir.

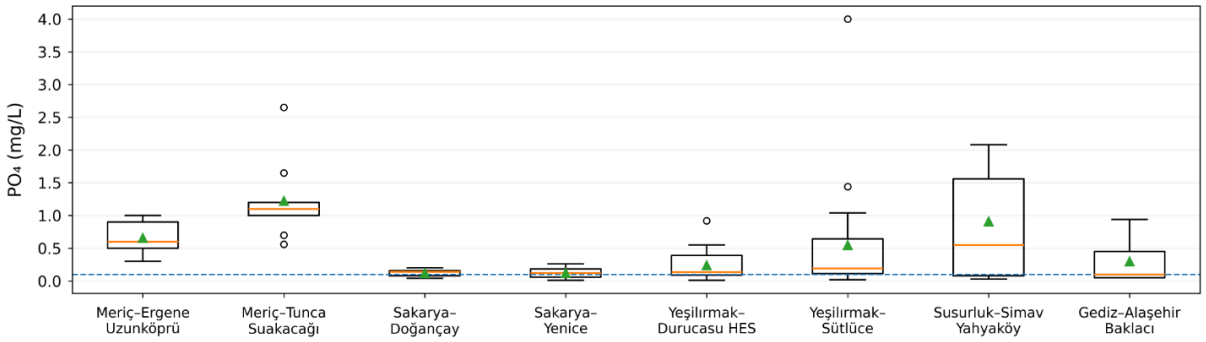


Şekil 4.2. Çalışma havzasındaki izleme istasyonlarında SAR, %Na ve CCME WQI değerlerinin kutu grafiği dağılımları

Şekil 4.2, sekiz izleme istasyonunda SAR, %Na ve CCME WQI değerlerinin dağılımını göstermektedir. SAR değerleri (Şekil 4.2a), tüm istasyonlarda düşük sodyum tehlike sınıfında (0-10) kalmış olup, medyan değerler 0,98 ile 1,42 arasında değişmektedir. %Na değerleri (Şekil 4.2b) genel olarak düşük sodyum tehlike sınıfında (%20-40) yer almıştır, ancak Gediz-Alaşehir ve Meriç-Tunca istasyonlarında %40'ı aşan aykırı değerler gözlemlenmiştir. CCME WQI değerleri (Şekil 4.2c) en geniş dağılımı göstermiş olup, Yeşilırmak-Durucasu ve Meriç-Tunca istasyonlarında düşük kalite aralığında belirgin aykırı değerler görülmüştür.



Şekil 4.3. İncelenen istasyonlarda CCME WQI hesaplamasında kullanılan su kalitesi parametrelerinin dağılımı



Şekil 4.3. İncelenen istasyonlarda CCME WQI hesaplamasında kullanılan su kalitesi parametrelerinin dağılımı (devamı)

Şekil 4.3'te, CCME WQI hesaplamasında kullanılan pH, elektriksel iletkenlik (EC), çözünmüş oksijen (DO), fosfat (PO_4) ve klorür (Cl) parametrelerinin incelenen istasyonlardaki dağılımları gösterilmiştir. Grafiklerdeki kutular, her istasyona ait ölçümlerin dağılımını; kutu içerisindeki yatay çizgi medyan değeri, yeşil üçgen ise ortalama değeri göstermektedir. Kutu dışında yer alan noktalar aykırı gözlemleri ifade etmektedir. EC, DO ve PO_4 grafiklerinde yer alan kesikli yatay çizgiler, sırasıyla 700 µS/cm, 5,5 mg/L ve 0,1 mg/L olarak kullanılan referans değerlerini göstermektedir. Buna göre, PO_4 değerlerinde kesikli çizginin üzerinde kalan gözlemler 0,1 mg/L referans değerinin üzerinde bulunmaktadır. Benzer şekilde, EC değerlerinin 700 µS/cm çizgisinin üzerinde olması kullanılan EC referans değerinin aşıldığını, DO değerlerinin 5,5 mg/L çizgisinin altında kalması ise kullanılan minimum DO referans değerinin altında olduğunu göstermektedir.

Havza bazında değerlendirildiğinde, Meriç Havzası'nda Ergene Uzunköprü ve Tunca Suakacağı istasyonlarında özellikle EC ve Cl değerlerinin diğer bazı istasyonlara göre daha yüksek ve değişken dağılımlar gösterdiği görülmektedir. Sakarya Havzası'nda Doğançay ve Yenice istasyonlarının parametre dağılımlarının genel olarak farklı aralıklarda seyrettiği; özellikle Yenice istasyonunda bazı parametrelerdeki dağılımın daha geniş olduğu dikkat çekmektedir. Yeşilırmak Havzası'nda Durucasu HES ve Sütlüce istasyonlarında parametrelerin dağılımlarının birbirinden farklı olduğu, özellikle PO_4 ve DO değerlerinde istasyonlar arasında değişkenlik bulunduğu görülmektedir. Susurluk Havzası'ndaki Simav Çayı–Yahyaköy istasyonunda özellikle DO değerlerinin daha geniş bir dağılım gösterdiği ve bazı yüksek değerli gözlemlerin bulunduğu görülmektedir. Gediz Havzası Alaşehir Çayı–Baklacı istasyonunda ise özellikle EC ve Cl değerlerinin dağılımı dikkat çekmekte, PO_4 değerlerinde de referans çizgisinin üzerinde kalan gözlemler bulunmaktadır.

Genel olarak, parametrelerin havza ve istasyonlara göre farklı dağılımlar göstermesi, su kalitesinin yalnızca tek bir parametre üzerinden değerlendirilmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle söz konusu parametrelerin birlikte değerlendirilmesiyle elde edilen CCME WQI değerleri, istasyonlardaki genel su kalitesi durumunun belirlenmesinde kullanılmıştır. Parametrelerin istatistiksel özelliklerinin daha ayrıntılı değerlendirilmesi amacıyla sonraki aşamada normallik testleri uygulanmıştır.

4.1. Normallik Testi Sonuçları

Shapiro–Wilk normallik testi sonuçları Tablo 4.3'de sunulmuştur. Bulgular, SDI ve %Na indekslerinin altı istasyonda, SAR indeksinin ise beş istasyonda normal dağılım sergilediğini göstermektedir. Buna karşılık, çok parametreli ve bileşik bir yapıya sahip olan CCME WQI indeksinin sekiz istasyonun beşinde normal dağılım varsayımını sağlamadığı belirlenmiştir. Bu durum, CCME WQI'nin tek parametreli veya iyon bileşimine dayalı indekslere kıyasla daha değişken bir dağılım yapısına sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Literatürde, çok parametreli su kalite indekslerinin özellikle kuraklık dönemlerinde seyreltme kapasitesinin azalması ve bazı parametrelerde ani konsantrasyon artışları nedeniyle normallikten sapma eğilimi gösterebildiği belirtilmektedir (Kazi vd., 2009; Li vd., 2020).

İstasyon bazında değerlendirildiğinde, Meriç Havzası'ndaki Tunca Nehri Suakacağı ve Ergene Nehri Uzunköprü istasyonlarında tüm indeksler normal dağılım sergilerken; Yeşilırmak ve Susurluk havzalarındaki bazı istasyonlarda birden fazla indeksin normallik varsayımından saptığı gözlenmiştir. Bu tür mekânsal farklılıkların, havzaya özgü hidrolojik yapı, arazi kullanımı ve antropojenik baskılarla ilişkili olduğu önceki çalışmalarda da vurgulanmaktadır (Demir vd., 2016; Varol vd., 2021).

Genel olarak normallik testi sonuçları, tek parametreli veya iyon bileşimine dayalı indekslerin (SAR, %Na ve SDI) daha düzenli bir dağılım yapısı sergilediğini; buna karşılık CCME WQI'nin istasyonlar arasında daha yüksek dağılım farklılığı gösterdiğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle, normallik varsayımının sağlanmadığı durumlarda parametrik olmayan istatistiksel testlerin kullanılması uygun görülmüştür.

Tablo 4.3. Akarsu istasyonlarına ait su kalitesi indekslerinin Shapiro-Wilk normallik testi sonuçları

Akarsu/İstasyon	SAR	%Na	SDI	CCME WQI
Gediz Havzası Alaşehir Çayı Baklacı	Normal Değil	Normal	Normal	Normal
Yeşilırmak Havzası Yeşilırmak Nehri Durucasu HES	Normal	Normal Değil	Normal Değil	Normal Değil
Susurluk Havzası Simav Çayı Yahyaköy	Normal Değil	Normal Değil	Normal	Normal Değil
Sakarya Havzası Sakarya Nehri Yenice	Normal	Normal	Normal	Normal Değil
Sakarya Havzası Sakarya Nehri Doğançay	Normal	Normal	Normal	Normal Değil
Meriç Havzası Tunca Nehri Suakacağı	Normal	Normal	Normal	Normal
Yeşilırmak Havzası Yeşilırmak Nehri Sütlüce	Normal Değil	Normal	Normal	Normal
Meriç Havzası Ergene Nehri Uzunköprü	Normal	Normal	Normal	Normal

Bu çalışmada kullanılan su kalitesi göstergeleri arasında en dikkat çekici sonuçlar CCME WQI indeksinde elde edilmiştir. SAR ve %Na indekslerinin aksine, CCME WQI değerleri istasyonlar arasında daha geniş bir değişim göstermiş, normallik testlerinde de birçok istasyonda normal dağılım varsayımını sağlamamıştır. Ayrıca Mann–Whitney U testi sonuçlarında, Yeşilırmak Havzası'nda yer alan Durucasu HES ($p=0,049$) ve Sütlüce ($p=0,022$) istasyonlarında SDI ile CCME WQI arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar belirlenmiştir. Buna karşın aynı istasyonlarda yapılan korelasyon analizlerinde anlamlı doğrusal bir ilişki belirlenmemiştir.

CCME WQI'nin diğer indekslerden farklı davranmasının temel nedeni, bu indeksin tek bir parametreyi değil, birden fazla su kalitesi parametresini birlikte değerlendirmesidir. CCME WQI; ölçülen parametrelerin standartları sağlama durumu, standartların aşılma sıklığı ve aşılma miktarını birlikte dikkate alan bileşik bir indekstir. Bu nedenle kuraklık dönemlerinde bazı parametrelerde belirgin değişimler meydana gelirken, diğer parametrelerin daha kararlı

kalması toplam indeks değerinin daha karmaşık bir yapı göstermesine neden olabilmektedir. Bu durum, CCME WQI'nin hidrolojik değişimlere verdiği tepkinin tek parametreli indekslere göre daha farklı olmasını açıklamaktadır.

Literatürde de benzer sonuçlar bildirilmektedir. Tyagi vd. (2013), çok parametreli su kalite indekslerinin tek parametreli göstergelere göre çevresel değişimlere daha duyarlı olduğunu, ancak farklı parametrelerin birbirini dengelemesi nedeniyle bazı etkilerin doğrudan görülemeyebileceğini belirtmiştir. Uddin vd. (2021) ise CCME WQI'nin özellikle kuraklık gibi çevresel baskıların su kalitesi üzerindeki kümülatif etkilerini değerlendirmede önemli avantajlar sağladığını ifade etmiştir. Bu çalışmada elde edilen bulgular da söz konusu araştırmaları desteklemekte ve hidrolojik kuraklığın su kalitesi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde çok parametreli indekslerin önemli bilgiler sağlayabileceğini göstermektedir.

4.2. Mann-Whitney U Testi Sonuçları

Normallik varsayımını sağlamayan veri grupları için uygulanan Mann–Whitney U testi sonuçları Tablo 4.4'te sunulmuştur. Bulgular, istasyonların büyük çoğunluğunda SDI ile CCME WQI, SAR ve %Na arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmadığını göstermektedir ($p > 0,05$).

Mann–Whitney U testi kapsamında, SDI değerleri 0'dan büyük olan gözlemler "sulak dönem", 0'dan küçük olan gözlemler ise "kurak dönem" olarak gruplandırılmış ve bu iki grup arasındaki farklılıklar değerlendirilmiştir.

İstasyon bazında, SDI–SAR ve SDI–%Na karşılaştırmalarında tüm p-değerlerinin 0,05'in üzerinde olduğu belirlenmiştir. SDI–CCME WQI karşılaştırmalarında ise Yeşilırmak Havzası'ndaki Durucasu ve Sütlüce istasyonlarında anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir ($p < 0,05$). Bu durum, CCME WQI'nin çok parametreli yapısı nedeniyle kuraklık koşullarına farklı ve dolaylı tepkiler verebilmesiyle açıklanabilir (Mosley, 2015; Tyagi vd., 2013).

Genel olarak sonuçlar, hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin çoğu istasyonda doğrusal ve eş zamanlı olmadığını göstermektedir.

Tablo 4.4. Farklı akarsu istasyonlarında SDI indeksi ile diğer indeksler arasındaki Mann Whitney U testi sonuçları

Akarsu/İstasyon	Karşılaştırma	U-İstatistiği	p-değeri	Anlamlı Fark(α=0.05)
Gediz Havzası Alaşehir Çayı Baklacı	SDI-CCME WQI	17.50	0.713	Hayır
	SDI-SAR	8.50	0.272	Hayır
	SDI-%Na	12.00	0.662	Hayır
Yeşilırmak Havzası Yeşilırmak Nehri Durucasu HES	SDI-CCME WQI	86.50	0.049	Evet
	SDI-SAR	56.50	0.920	Hayır
	SDI-%Na	52.00	0.688	Hayır
Susurluk Havzası Simav Çayı Yahyaköy	SDI-CCME WQI	10.00	0.384	Hayır
	SDI-SAR	2.00	0.222	Hayır
	SDI-%Na	3.00	0.333	Hayır
Sakarya Havzası Sakarya Nehri Yenice	SDI-CCME WQI	72.00	0.438	Hayır
	SDI-SAR	43.50	0.289	Hayır
	SDI-%Na	48.50	0.468	Hayır
Sakarya Havzası Sakarya Nehri Doğançay	SDI-CCME WQI	37.00	0.311	Hayır
	SDI-SAR	21.00	0.463	Hayır
	SDI-%Na	15.00	0.152	Hayır
Meriç Havzası Tunca Nehri Suakacağı	SDI-CCME WQI	12.00	0.547	Hayır
	SDI-SAR	15.00	0.285	Hayır
	SDI-%Na	10.00	0.571	Hayır
Yeşilırmak Havzası Yeşilırmak Nehri Sütlüce	SDI-CCME WQI	72.00	0.022	Evet
	SDI-SAR	39.50	0.844	Hayır
	SDI-%Na	43.00	1.000	Hayır
Meriç Havzası Ergene Nehri Uzunköprü	SDI-CCME WQI	6.00	0.412	Hayır
	SDI-SAR	9.00	0.904	Hayır
	SDI-%Na	8.00	0.730	Hayır

Bu çalışmada Mann–Whitney U testi sonuçları, hidrolojik kuraklık dönemleri ile normal dönemler arasında su kalitesi indekslerinin her istasyonda aynı davranışı göstermediğini ortaya koymuştur. İncelenen sekiz istasyonun büyük bölümünde SDI ile SAR, %Na ve CCME WQI arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık belirlenmezken, yalnızca

Yeşilırmak Havzası'nda yer alan Durucasu HES ve Sütlüce istasyonlarında SDI ile CCME WQI arasında anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir. Bu sonuç, hidrolojik kuraklığın su kalitesi üzerindeki etkisinin bütün havzalarda aynı şekilde gerçekleşmediğini, havzaya özgü hidrolojik ve çevresel özelliklerin bu ilişki üzerinde belirleyici olabileceğini göstermektedir.

Yeşilırmak Havzası'nda elde edilen bu bulgular, kuraklık dönemlerinde su kalitesinde dönemsel farklılıklar oluşabileceğini göstermektedir. Nitekim aynı istasyonlarda gerçekleştirilen korelasyon analizlerinde anlamlı doğrusal ilişkiler belirlenmemiştir. Bu durum, hidrolojik kuraklığın su kalitesi üzerindeki etkisinin sürekli artan veya azalan bir değişim yerine dönemsel farklılıklar şeklinde ortaya çıkabileceğini düşündürmektedir. Dolayısıyla Mann–Whitney U testi ile korelasyon analizlerinden elde edilen sonuçlar birbirini tamamlamakta ve hidrolojik kuraklık–su kalitesi ilişkisinin yalnızca doğrusal istatistiksel yöntemlerle açıklanamayacağını ortaya koymaktadır.

Yeşilırmak Havzası'nda gözlenen bu farklılığın, yalnızca akım miktarındaki değişimlerden kaynaklandığını söylemek mümkün değildir. Havzanın doğal yapısı, arazi kullanımı, tarımsal faaliyetler ve su kalitesini etkileyen diğer çevresel faktörler de bu sonuç üzerinde etkili olabilir. Özellikle CCME WQI'nin çok sayıda su kalitesi parametresini birlikte değerlendiren bileşik bir indeks olması nedeniyle, kuraklık dönemlerinde bazı parametrelerde meydana gelen değişimler toplam indeks değerine daha belirgin şekilde yansıyabilmektedir. Bu nedenle, hidrolojik kuraklığın su kalitesi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde tek parametreye dayalı göstergelerin yanı sıra çok parametreli indekslerin birlikte kullanılması, daha kapsamlı ve güvenilir değerlendirmeler yapılmasına katkı sağlayacaktır.

Literatürde de benzer sonuçlar bildirilmektedir. Tyagi vd. (2013) ve Uddin vd. (2021), çok parametreli su kalite indekslerinin çevresel değişimlere daha duyarlı olduğunu, ancak farklı parametrelerin farklı tepkiler vermesi nedeniyle doğrusal ilişkilerin her zaman ortaya çıkmayabileceğini belirtmiştir. Bu çalışmada Yeşilırmak Havzası'nda elde edilen bulgular da söz konusu araştırmaları desteklemekte ve kuraklık–su kalitesi ilişkisinin değerlendirilmesinde çok parametreli indekslerin kullanımının önemli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, hidrolojik kuraklığın su kalitesi üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde tek parametreye dayalı göstergeler yerine, çok parametreli indekslerin de birlikte kullanılması daha kapsamlı değerlendirmeler yapılmasına katkı sağlayacaktır.

Buna karşılık Meriç, Sakarya ve Susurluk havzalarında istatistiksel olarak anlamlı farklılıkların belirlenmemesi, hidrolojik kuraklığın su kalitesi üzerindeki etkisinin her havzada aynı düzeyde ortaya çıkmadığını göstermektedir. Bu durum, hidrolojik kuraklığın tek başına su kalitesindeki değişimleri açıklamak için yeterli olmadığını ve havza özelliklerinin birlikte değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Bu bulgu, kuraklık–su kalitesi ilişkisinin havzaya özgü olarak değerlendirilmesi gerektiğini desteklemektedir.

Sonuç olarak Mann–Whitney U testi, hidrolojik kuraklığın su kalitesi üzerindeki etkilerinin tüm havzalarda aynı olmadığını ortaya koymuştur. Bu bulgular, kuraklık–su kalitesi ilişkisinin değerlendirilmesinde yalnızca tek bir istatistiksel yöntemin yeterli olmadığını; farklı istatistiksel yöntemlerin birlikte kullanılmasının ve sonuçların havza özellikleri ile birlikte değerlendirilmesinin daha güvenilir ve kapsamlı sonuçlar sağlayacağını göstermektedir.

4.3. Korelasyon Analizi Sonuçları

SDI ile su kalitesi indeksleri arasındaki doğrusal ilişkileri değerlendirmek amacıyla yapılan korelasyon analizleri (Tablo 4.5), tüm istasyonlarda SDI ile CCME WQI, SAR ve %Na arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmadığını göstermiştir ($p > 0,05$). Bazı istasyonlarda zayıf veya orta düzeyde korelasyon katsayıları gözlenmiş olsa da, bu ilişkiler istatistiksel anlamlılık düzeyine ulaşmamıştır. Özellikle Susurluk Havzası Yahyaköy ve Yeşilırmak Havzası Sütlüce istasyonlarında SDI ile CCME WQI arasında gözlenen negatif yönlü ilişkiler, kuraklık koşullarında su kalitesi tepkilerinin doğrusal olmayan ve gecikmeli bir yapı sergileyebileceğine işaret etmektedir.

Bu bulgular, SDI'nin akım miktarındaki değişimleri doğrudan yansıtan ve hidrometeorolojik koşullara hızlı tepki veren bir gösterge olduğunu; buna karşılık SAR ve %Na gibi iyonik indekslerin jeolojik yapı, mineral çözünmesi ve uzun dönemli hidrojeokimyasal süreçler tarafından daha güçlü biçimde kontrol edildiğini ortaya koymaktadır (Richards, 1954; Ayers ve Westcot, 1985; Apodaca vd., 2002). Dolayısıyla, SDI ile iyonik su kalitesi indeksleri arasında güçlü doğrusal ilişkilerin tespit edilememesi, metodolojik bir eksiklikten ziyade kuraklık–su kalitesi etkileşiminin karmaşık doğasının bir göstergesi olarak değerlendirilmelidir (Whitehead vd., 2009; Mosley, 2015).

Tablo 4.5. Farklı akarsu istasyonlarında SDI indeksi ile diğer indeksler arasındaki korelasyon analizi sonuçları

Akarsu/İstasyon	Karşılaştırma	Pearson / Spearman	Korelasyon Katsayısı	p-değeri	Anlamlı Korelasyon(α=0.05)
Gediz Havzası Alaşehir Çayı Baklacı	SDI-CCME WQI	Pearson(r)	0.0175	0.9593	Hayır
	SDI-SAR	Spearman(p)	0.4966	0.1202	Hayır
	SDI-%Na	Pearson(r)	0.2536	0.4517	Hayır
Yeşilırmak Havzası Yeşilırmak Nehri Durucasu HES	SDI-CCME WQI	Spearman(p)	-0.3980	0.0669	Hayır
	SDI-SAR	Spearman(p)	0.1240	0.5837	Hayır
	SDI-%Na	Spearman(p)	0.0950	0.6725	Hayır
Susurluk Havzası Simav Çayı Yahyaköy	SDI-CCME WQI	Spearman(p)	-0.6337	0.0669	Hayır
	SDI-SAR	Spearman(p)	0.3167	0.4064	Hayır
	SDI-%Na	Spearman(p)	0.2333	0.5457	Hayır
Sakarya Havzası Sakarya Nehri Yenice	SDI-CCME WQI	Spearman(p)	-0.3192	0.1477	Hayır
	SDI-SAR	Pearson(r)	0.3215	0.1445	Hayır
	SDI-%Na	Pearson(r)	0.4537	0.0339	Evet
Sakarya Havzası Sakarya Nehri Doğançay	SDI-CCME WQI	Spearman(p)	0.0441	0.8759	Hayır
	SDI-SAR	Pearson(r)	0.0989	0.7257	Hayır
	SDI-%Na	Pearson(r)	0.2149	0.4418	Hayır
Meriç Havzası Tunca Nehri Suakacağı	SDI-CCME WQI	Spearman(p)	-0.2333	0.5457	Hayır
	SDI-SAR	Pearson(r)	-0.0063	0.9872	Hayır
	SDI-%Na	Pearson(r)	-0.4350	0.2420	Hayır
Yeşilırmak Havzası Yeşilırmak Nehri Sütlüce	SDI-CCME WQI	Pearson(r)	-0.3752	0.0853	Hayır
	SDI-SAR	Spearman(p)	0.1482	0.5104	Hayır
	SDI-%Na	Pearson(r)	0.1044	0.6437	Hayır
Meriç Havzası Ergene Nehri Uzunköprü	SDI-CCME WQI	Pearson(r)	-0.0063	0.9872	Hayır
	SDI-SAR	Pearson(r)	0.4155	0.2661	Hayır
	SDI-%Na	Pearson(r)	0.4539	0.2197	Hayır

Not: SDI, Akım Kuraklık İndeksi; CCME WQI, Kanada Çevre Bakanları Konseyi Su Kalitesi Endeksi; SAR, sodyum adsorpsiyon oranı; %Na, sodyum yüzdesi anlamına gelmektedir. Pearson korelasyon katsayısı (r) ve Spearman korelasyon katsayısı (ρ) kullanılmıştır. İstatistiksel anlamlılık α = 0,05 düzeyinde değerlendirilmiştir.

Korelasyon analizleri, hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin yönünü ve düzeyini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, incelenen sekiz istasyonun büyük bölümünde SDI ile SAR, %Na ve CCME WQI indeksleri arasında istatistiksel olarak anlamlı doğrusal ilişkiler belirlenmemiştir. Bu durum, hidrolojik kuraklığın su kalitesi üzerindeki etkilerinin tüm havzalarda benzer şekilde ortaya çıkmadığını ve kuraklık–su kalitesi ilişkisinin yalnızca doğrusal korelasyon analizleriyle açıklanmasının yeterli olmadığını göstermektedir.

Çalışmada dikkat çeken bulgulardan biri, Sakarya Havzası Sakarya Nehri Yenice istasyonunda SDI ile %Na arasında belirlenen pozitif yönlü ve istatistiksel olarak anlamlı korelasyondur ($r=0,4537$; $p=0,0339$). Bu sonuç, diğer istasyonlarda elde edilen bulgulardan farklılık göstermektedir. Korelasyon katsayısının pozitif olması, SDI değerleri ile %Na değerlerinin aynı yönde değiştiğini göstermektedir. Bununla birlikte, bu ilişkinin doğrudan hidrolojik kuraklıktan kaynaklandığını söylemek mümkün değildir. Çünkü %Na değerleri yalnızca akım miktarından değil, suyun kimyasal bileşimi, jeolojik yapı, yeraltı suyu katkısı ve havza içerisindeki arazi kullanım özelliklerinden de etkilenmektedir. Bu nedenle Yenice istasyonunda belirlenen ilişki, havzaya özgü hidrolojik ve çevresel koşulların birlikte değerlendirilmesini gerektirmektedir.

Buna karşılık, Yeşilırmak Havzası Durucasu HES ($r=-0,3980$; $p=0,0669$) ve Yeşilırmak Havzası Sütlüce ($r=-0,3752$; $p=0,0853$) istasyonlarında SDI ile CCME WQI arasında negatif yönlü korelasyon eğilimleri belirlenmesine rağmen, bu ilişkiler istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Negatif yönlü bu eğilimler, SDI değerlerindeki azalma ile CCME WQI değerlerindeki artış yönünde bir değişim eğilimi olduğunu göstermektedir. Ancak ilişkiler istatistiksel olarak anlamlı olmadığından, bu eğilim üzerinden hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasında kesin bir ilişki kurulamaz. Ancak örneklem sayısının sınırlı olması ve su kalitesini etkileyen çok sayıdaki çevresel faktör nedeniyle bu eğilimler istatistiksel olarak doğrulanamamıştır. Buna rağmen, Mann–Whitney U testinde aynı istasyonlarda anlamlı farklılıkların belirlenmiş olması, korelasyon analizinde anlamlı bir ilişki saptanmamasına rağmen, hidrolojik dönemlere göre su kalitesi değerlerinin farklılaşabildiğini göstermektedir.

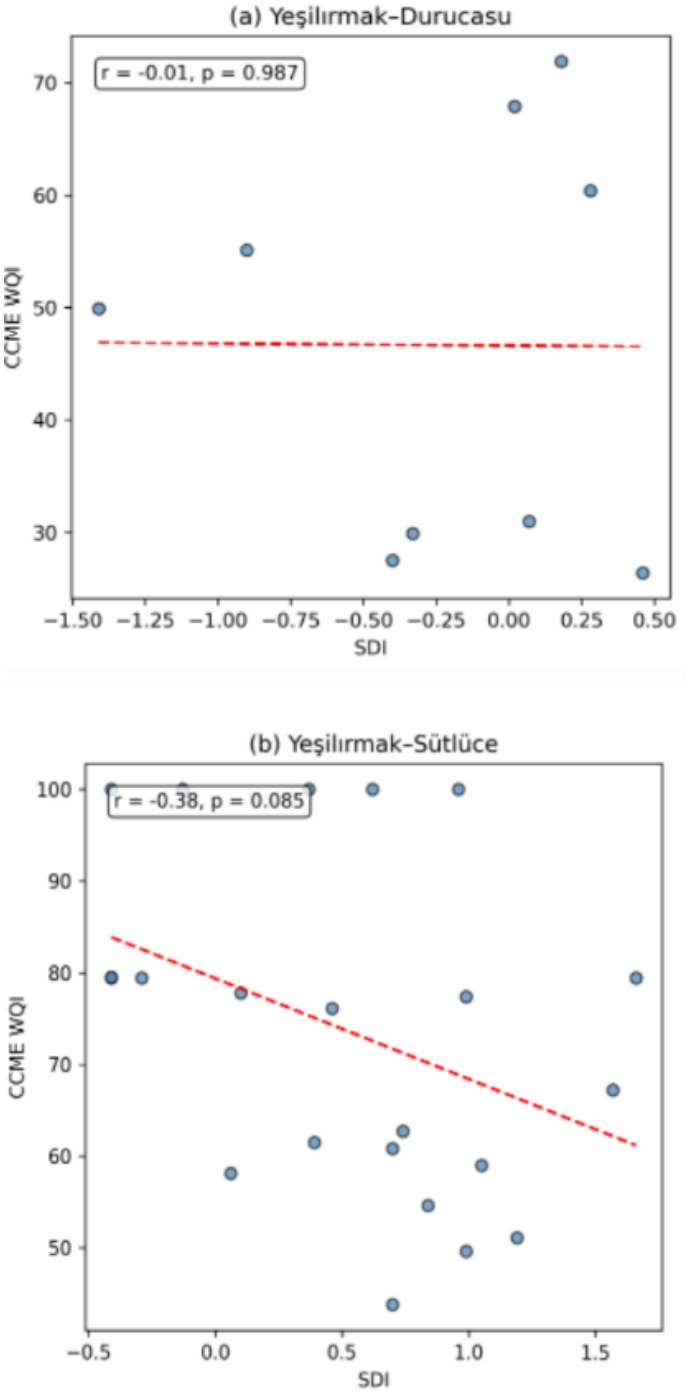
Meriç Havzası (Ergene Nehri Uzunköprü ve Tunca Nehri Suakacağı), Susurluk Havzası (Simav Çayı Yahyaköy), Gediz Havzası (Alaşehir Çayı Baklacı) ve Sakarya Havzası Doğançay istasyonlarında ise SDI ile su kalitesi indeksleri arasında istatistiksel olarak anlamlı korelasyonlar belirlenmemiştir. Bu bulgu, hidrolojik kuraklığın tek başına sulama suyu

kalitesini açıklayan bir etken olmadığını göstermektedir. Havzaların jeolojik yapısı, akarsu yatağının özellikleri, tarımsal faaliyetlerin yoğunluğu, yeraltı suyu katkısı ve çevresel baskılar gibi birçok faktörün birlikte etkili olması, benzer kuraklık koşullarında dahi farklı su kalitesi tepkilerinin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir.

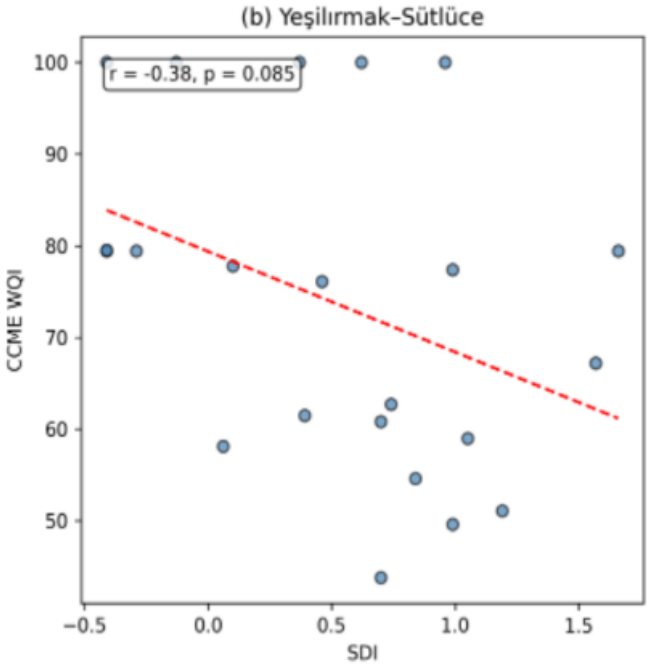
Bu çalışmada elde edilen korelasyon sonuçları, Mosley (2015) tarafından bildirilen bulgularla uyumludur. Söz konusu araştırmalarda da hidrolojik kuraklığın su kalitesi üzerindeki etkilerinin doğrusal ve tek yönlü bir ilişki göstermediği, havza özellikleri ile çevresel koşulların belirleyici olduğu belirtilmektedir. Benzer şekilde Whitehead vd. (2009), akım miktarındaki değişimlerin su kalitesi üzerinde doğrudan etkili olmakla birlikte, bu etkinin havzanın fiziksel özellikleri ve kirletici kaynaklarının dağılımına bağlı olarak farklılık gösterebileceğini ifade etmektedir. Bu çalışmada farklı havzalarda elde edilen sonuçlar da bu değerlendirmeleri desteklemektedir.

Genel olarak korelasyon analizleri, hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin tek bir istatistiksel yöntem veya tek bir su kalite göstergesi kullanılarak açıklanamayacağını ortaya koymaktadır. Bu nedenle kuraklık–su kalitesi etkileşiminin değerlendirilmesinde farklı istatistiksel yöntemlerin birlikte kullanılması ve havzaya özgü çevresel özelliklerin dikkate alınması, daha güvenilir ve kapsamlı sonuçların elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

Anlamlı korelasyon için regresyon grafiği gösterilmiştir ($p < 0,05$). Her panel için Pearson korelasyon katsayısı (r) ve p değeri verilmiştir. Şekil 4.4, korelasyon analizindeki anlamlı ilişkilerin dağılım grafiklerini göstermektedir. Sakarya-Yenice istasyonunda (Şekil 4.4c), SDI ile Na% arasında pozitif ve istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon bulunmuştur ($r = 0,45$, $p = 0,03$). Bu, hidrolojik kuraklığın şiddeti arttıkça (SDI azaldıkça), Na% değerlerinin de azaldığını ve beklentilerin aksine bir ilişkiyi göstermektedir. Yeşilırmak-Durucasu (Şekil 4.4a) ve Yeşilırmak-Sütlüce (Şekil 4.4b) istasyonlarında, SDI ile CCME WQI arasında negatif bir korelasyon eğilimi gözlemlenmiştir, ancak korelasyon katsayıları sırasıyla $r = –0,40$ ($p = 0,07$) ve $r = –0,38$ ($p = 0,09$) olup istatistiksel anlamlılık sınırına ulaşmamıştır. Bu istasyonlardaki Mann-Whitney U testinde (Tablo 4.4) görülen önemli farklılıklar, doğrusal bir ilişkiden ziyade kuraklık ve normal dönemler arasındaki dağılım farklılıklarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.4. (a) Yeşilırmak–Durucasu, (b) Yeşilırmak–Sütlüce ve (c) Sakarya–Yenice istasyonlarında SDI ile CCME WQI ve %Na arasındaki saçılım grafikleri



Şekil 4.4. (a) Yeşilırmak–Durucasu, (b) Yeşilırmak–Sütlüce ve (c) Sakarya–Yenice istasyonlarında SDI ile CCME WQI ve %Na arasındaki saçılım grafikleri (devamı)

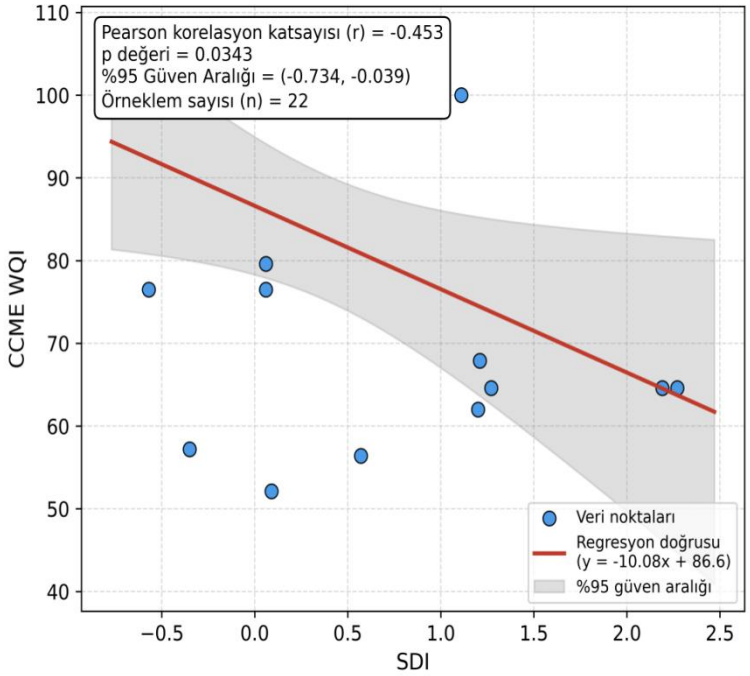
Tablo 4.6. SDI ile su kalitesi indeksleri arasındaki doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modellerine ait belirleme katsayıları (R^2)

İstasyon	Değişkenler	Doğrusal (R^2)	Logaritmik (R^2)	Üstel (R^2)	En yüksek açıklayıcılık
Yeşilırmak–Durucasu	SDI – CCME WQI	0,21	0,01	0,07	Doğrusal
Sakarya–Yenice	SDI – %Na	0,21	0,23	0,19	Logaritmik
Yeşilırmak–Sütlüce	SDI – CCME WQI	0,13	0,003	0,14	Üstel

Not: Regresyon modellerinin performansı belirleme katsayısı (R^2) kullanılarak değerlendirilmiştir. Daha yüksek R^2 değeri, karşılaştırılan modeller arasında açıklayıcılığın daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, en yüksek R^2 değerinin elde edilmesi ilişkinin güçlü olduğu anlamına gelmemektedir.

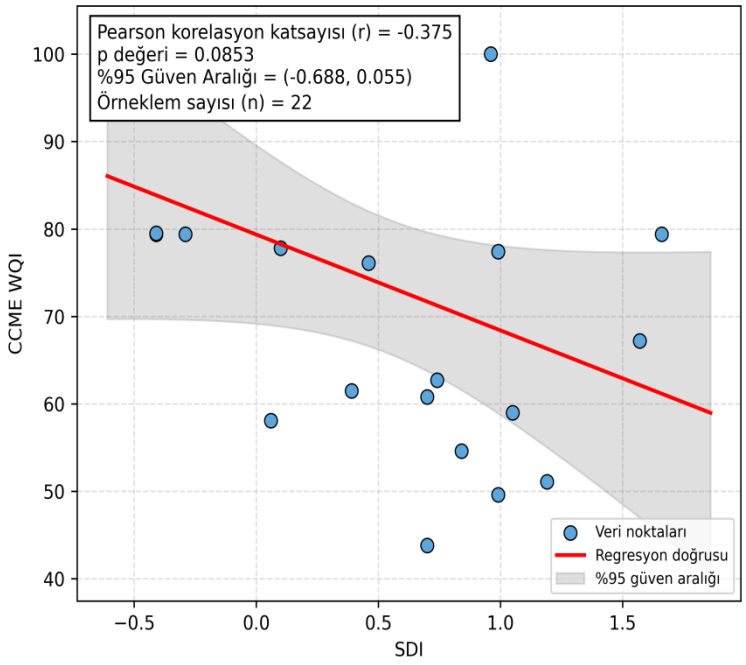
Korelasyon analizlerinde belirlenen anlamlı veya anlamlılık düzeyine yakın ilişkilerin daha ayrıntılı değerlendirilmesi amacıyla doğrusal, logaritmik ve üstel regresyon modelleri karşılaştırılmıştır. Modellerin performansı belirleme katsayısı (R^2) değerleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Sakarya–Yenice istasyonunda SDI ile %Na arasındaki ilişkide logaritmik model (R^2=0,23), doğrusal (R^2=0,21) ve üstel (R^2=0,19) modellere göre sınırlı düzeyde daha yüksek açıklayıcılık göstermiştir. Bununla birlikte, korelasyon katsayısı (r=0,4537) ilişkinin pozitif yönlü ve zayıf düzeyde olduğunu göstermektedir. Yeşilırmak–Durucasu istasyonunda SDI ile CCME WQI arasındaki ilişkide en yüksek R^2 değeri doğrusal modelde (R^2=0,21), Yeşilırmak–Sütlüce istasyonunda ise üstel modelde (R^2=0,14) elde edilmiştir. Her üç

istasyonda da R^2 değerlerinin düşük olması, regresyon modellerinin açıklayıcılığının sınırlı olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin tüm havzalarda aynı yapıyı göstermediğini, havzaya özgü hidrolojik ve çevresel koşullara bağlı olarak doğrusal veya doğrusal olmayan özellikler sergileyebileceğini ortaya koymaktadır. Bu nedenle kuraklık–su kalitesi ilişkisinin değerlendirilmesinde tek bir regresyon modeline bağlı kalınmaması, farklı model yaklaşımlarının birlikte değerlendirilmesi daha güvenilir sonuçlar sağlayacaktır.

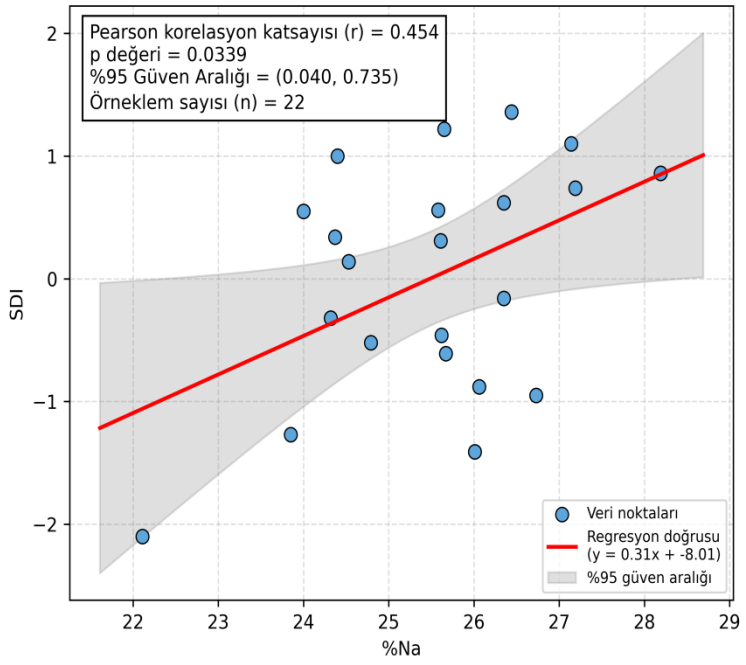


(a)Yeşilırmak-Durucasu

Şekil 4.5. Yeşilırmak–Durucasu (a), Yeşilırmak–Sütlüce (b) ve Sakarya–Yenice (c) istasyonlarında SDI ile CCME WQI ve %Na arasındaki regresyon grafikleri



(b) Yeşilırmak-Sütlüce



(c) Sakarya-Yenice

Şekil 4.5. Yeşilırmak–Durucasu (a), Yeşilırmak–Sütlüce (b) ve Sakarya–Yenice (c) istasyonlarında SDI ile CCME WQI ve %Na arasındaki regresyon grafikleri (devamı)

Anlamlı korelasyonlar için regresyon grafikleri, Pearson korelasyon katsayısı (r), p değeri ve %95 güven aralığı ile birlikte sunulmuştur. Şekil 4.5, hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi göstergeleri arasındaki doğrusal ilişkilerin dağılımını göstermektedir. Sakarya–Yenice istasyonunda (Şekil 4.5c), SDI ile %Na arasında pozitif yönlü ve istatistiksel olarak anlamlı bir korelasyon belirlenmiştir ($r = 0,45$; $p = 0,03$). Bu durum, SDI değerleri arttıkça %Na değerlerinin de artış eğilimi gösterdiğini ortaya koymaktadır. Diğer bir ifadeyle, hidrolojik kuraklığın şiddeti arttıkça (SDI değerleri azaldıkça) %Na değerlerinde de azalma eğilimi gözlenmiştir.

Yeşilırmak–Durucasu istasyonunda (Şekil 4.5a), SDI ile CCME WQI arasında orta düzeyde, negatif yönlü ve istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki belirlenmiştir ($r = -0,45$; $p = 0,03$). Buna karşılık, Yeşilırmak–Sütlüce istasyonunda (Şekil 4.4b) SDI ile CCME WQI arasında benzer şekilde negatif yönlü bir ilişki gözlenmesine rağmen ($r = -0,38$; $p = 0,09$), bu ilişki istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır.

Mann–Whitney U testi sonuçları ile birlikte değerlendirildiğinde, kurak ve kurak olmayan dönemler arasındaki anlamlı farklılıkların, sabit ve doğrusal bir ilişkiden ziyade veri değerlerinin dönemlere göre farklılık göstermesinden kaynaklandığı anlaşılmaktadır.

Doğrusal regresyon analizlerine ek olarak, literatürde bildirilen doğrusal olmayan hidrolojik tepkilerin değerlendirilmesi amacıyla logaritmik ve üstel regresyon modelleri de incelenmiştir (Van Vliet vd., 2023; Mosley, 2015; Schafer vd., 2021). Belirleme katsayıları (R^2) karşılaştırıldığında, Yeşilırmak–Durucasu istasyonunda SDI ile CCME WQI arasındaki ilişkiyi en iyi doğrusal model açıklamıştır (Doğrusal: $R^2 = 0,21$; Logaritmik: $R^2 = 0,01$; Üstel: $R^2 = 0,07$). Benzer şekilde, Sakarya–Yenice istasyonunda SDI ile %Na arasındaki ilişkide logaritmik model ($R^2 = 0,23$), doğrusal ($R^2 = 0,21$) ve üstel ($R^2 = 0,19$) modellere göre sınırlı düzeyde daha yüksek açıklayıcılık göstermiştir. Buna karşılık, Yeşilırmak–Sütlüce istasyonunda SDI ile CCME WQI arasındaki ilişkide tüm regresyon modellerinin açıklayıcılığı düşük bulunmuş, en yüksek belirleme katsayısı üstel modelde elde edilmiştir (Doğrusal: $R^2 = 0,13$; Logaritmik: $R^2 = 0,003$; Üstel: $R^2 = 0,14$).

Doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modellerinin karşılaştırılması, hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin istasyonlar arasında farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. Bazı istasyonlarda doğrusal model değişkenliği daha iyi açıklarken, bazı istasyonlarda logaritmik veya üstel modeller nispeten daha yüksek uyum sağlamıştır. Bu

bulgular, kuraklık–su kalitesi ilişkisinin havzaya özgü olduğunu ve yerel hidrolojik ile çevresel koşulların etkisiyle hem doğrusal hem de doğrusal olmayan tepki örüntülerinin ortaya çıkabileceğini göstermektedir. Ayrıca, kuraklık–su kalitesi ilişkisinin her havza için ayrı ayrı değerlendirilmesi, gelecekte yapılacak çalışmalarda daha güvenilir ve kapsamlı sonuçların elde edilmesine katkı sağlayacaktır.

4.4. Trend Analizi Sonuçları

Bu çalışmada, hidrolojik kuraklık ile su kalitesinin zamansal değişim eğilimlerini belirlemek amacıyla trend analizleri gerçekleştirilmiştir. Genel su kalitesi eğilimlerinin değerlendirilmesinde, tuzluluk temelli indeksler yerine su kalitesini bütüncül olarak yansıtan Kanada Su Kalitesi İndeksi (CCME WQI) tercih edilmiştir. Trend analizlerinin uzun dönemli veri gerektirmesi nedeniyle analizler, yeterli veri uzunluğuna sahip seçilmiş istasyonlarda SDI ve CCME WQI serileri kullanılarak yürütülmüştür. Bu kapsamda Mevsimsel Mann–Kendall (SMK) testi ile istatistiksel olarak anlamlı eğilimler belirlenmiş, Kendall'ın tau katsayısı ile eğilimlerin yönü, Sen Eğimi yöntemi ile ise eğilimlerin büyüklüğü değerlendirilmiştir. Trend analizleri, Python (v3.11) programlama dili kullanılarak Google Colaboratory ortamında gerçekleştirilmiştir. Elde edilen trend analizi sonuçları aşağıda ayrıntılı olarak sunulmuş ve değerlendirilmiştir.

Tablo 4.7. Seçilmiş istasyonlarda SDI ve CCME WQI serilerine ait Mevsimsel Mann–Kendall trend analizi sonuçları

	SDI				**CCME**			
İstasyon	**SDIp değeri (α = 0,05)**	**Kendall'ın tau katsayısı**	**Sen'in Eğim Değeri**	**Trend**	**CCME WQIp değeri (α = 0,05)**	**Kendall'ın tau katsayısı**	**Sen'in Eğim Değeri**	**Trend**
Sakarya Nehri Doğançay İstasyonu	0,04	1 (↑)	1,18	Var (Artan)	1,00	0,0	0,0	Yok
Sakarya Nehri Yenice İstasyonu	0,11	0,6 (↑)	0,88	Yok	1,00	0,0	−7,85	Yok

Tablo 4.7. Seçilmiş istasyonlarda SDI ve CCME WQI serilerine ait Mevsimsel Mann–Kendall trend analizi sonuçları (devamı)

Yeşilırmak Nehri Sütlüce İstasyonu	0,027	0,8 (↑)	0,86	Var (Artan)	0,004	−1 (↓)	−23	Var (Azalan)
Yeşilırmak Nehri Durucasu HES İstasyonu	0,34	0,4 (↑)	1,14	Yok	0,08	−0,6 (↓)	−27,8	Yok

Tablo 4.7'de seçilmiş istasyonlara ait SDI ve CCME WQI serilerinin Mevsimsel Mann–Kendall (SMK) trend analizi sonuçları sunulmaktadır. SDI serileri açısından değerlendirildiğinde, Sakarya Nehri Doğançay ($p = 0,04 < 0,05$) ve Yeşilırmak Nehri Sütlüce ($p = 0,027 < 0,05$) istasyonlarında istatistiksel olarak anlamlı artan eğilim belirlenmiştir. Bu istasyonlarda Kendall'ın tau katsayılarının sırasıyla 1 ve 0,8 olması, hidrolojik kuraklık indeksinde güçlü pozitif yönlü bir eğilime işaret etmektedir. Buna karşılık, Sakarya Nehri Yenice ve Yeşilırmak Nehri Durucasu HES istasyonlarında SDI serileri açısından istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim belirlenmemiştir ($p > 0,05$).

CCME WQI serileri incelendiğinde ise yalnızca Yeşilırmak Nehri Sütlüce istasyonunda istatistiksel olarak anlamlı azalan bir eğilim belirlenmiştir ($p = 0,004 < 0,01$). Bu istasyonda Kendall'ın tau katsayısının −1 olması, su kalitesinde oldukça güçlü ve sürekli bir azalış eğilimine işaret etmektedir. Buna karşılık, Sakarya Nehri Doğançay, Sakarya Nehri Yenice ve Yeşilırmak Nehri Durucasu HES istasyonlarında CCME WQI serileri açısından istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim tespit edilmemiştir ($p > 0,05$).

Trend analizi sonuçları, hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin tüm istasyonlarda benzer eğilim göstermediğini ortaya koymuştur. Özellikle Yeşilırmak Nehri Sütlüce istasyonunda SDI serilerinde artan, CCME WQI serilerinde ise azalan eğilim belirlenmesi, hidrolojik koşullardaki değişimlerin su kalitesi üzerindeki etkisinin havzaya özgü olabileceğini göstermektedir. Buna karşılık diğer istasyonlarda istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim belirlenmemesi, su kalitesindeki zamansal değişimlerin yalnızca hidrolojik kuraklıkla açıklanamayacağını; jeolojik yapı, arazi kullanımı, kirletici yükleri ve antropojenik faaliyetler gibi çevresel faktörlerin de etkili olabileceğini düşündürmektedir.

Özellikle Yeşilırmak Nehri Sütlüce istasyonunda SDI serilerinde artan eğilim belirlenmesine rağmen CCME WQI değerlerinde azalan eğilim gözlenmesi, hidrolojik olarak daha nemli veya akımın arttığı dönemlerde dahi su kalitesinin iyileşmeyebileceğini göstermektedir. Bu durum, artan akımla birlikte taşınan sediment, besin elementleri ve diğer kirleticilerin su kalitesi üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceğini düşündürmektedir.

Elde edilen bulgular, Katipoğlu vd. (2022) tarafından Yeşilırmak Havzası'nda gerçekleştirilen çalışmanın sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Söz konusu çalışmada da bazı istasyonlarda hidrolojik kuraklık eğilimlerinin arttığı belirlenmiş ve havza bazlı kuraklık yönetiminin önemine dikkat çekilmiştir. Benzer şekilde Van Vliet vd. (2017) ve Mosley (2015), su kalitesindeki değişimlerin yalnızca akım koşullarına bağlı olmadığını, havzanın hidrolojik özellikleri, kirletici yükleri ve çevresel baskılar gibi birçok faktörün birlikte değerlendirilmesi gerektiğini belirtmiştir. Bu çalışmada özellikle Yeşilırmak Nehri Sütlüce istasyonunda belirlenen anlamlı eğilimler, hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin havzaya özgü olduğunu ortaya koyarak söz konusu çalışmaların bulgularını desteklemektedir.

Bu çalışmada elde edilen bulgular, hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin tüm havzalarda benzer şekilde gerçekleşmediğini ortaya koymuştur. Aynı istatistiksel yöntemlerin uygulanmasına rağmen istasyonlar arasında farklı sonuçların elde edilmesi, kuraklık–su kalitesi etkileşiminin yalnızca hidrolojik koşullar tarafından değil, havzaların doğal ve çevresel özellikleri tarafından da şekillendiğini göstermektedir. Çalışma kapsamında değerlendirilen Meriç, Sakarya, Yeşilırmak, Susurluk ve Gediz havzaları; jeolojik yapı, topoğrafya, iklim özellikleri, arazi kullanımı ve tarımsal faaliyetler bakımından birbirinden farklı özellikler göstermektedir. Bu farklılıklar, hidrolojik kuraklık dönemlerinde akarsu akımındaki değişimlerin su kalitesine yansıma biçimini de etkilemektedir.

Yeşilırmak Havzası'nda yer alan Durucasu HES ve Sütlüce istasyonlarında Mann–Whitney U testinde belirlenen anlamlı farklılıklar, bu havzada kurak ve normal dönemler arasında su kalitesinin değişebildiğini göstermektedir. Ancak aynı istasyonlarda korelasyon analizlerinde anlamlı doğrusal ilişkilerin belirlenmemesi, kuraklığın etkisinin sürekli bir eğilim şeklinde değil, dönemsel değişimler biçiminde ortaya çıktığını düşündürmektedir. Bu durum, su kalitesini etkileyen süreçlerin yalnızca akım miktarıyla açıklanamayacağını, havza içerisindeki çevresel koşulların da önemli rol oynadığını göstermektedir.

Özellikle tarımsal faaliyetlerin yoğun olduğu havzalarda yağış ve yüzey akışıyla birlikte taşınan azot, fosfor, askıda katı madde ve diğer kirleticiler su kalitesini doğrudan etkileyebilmektedir. Bu nedenle hidrolojik olarak daha yüksek akım koşullarında dahi su kalitesinde iyileşme görülmeyebilir. Literatürde bu durum "flushing effect (yıkama etkisi)" olarak tanımlanmakta olup, yağış sonrası yüzey akışı ile kirleticilerin akarsu sistemine taşınmasını ifade etmektedir (Schwarzenbach vd., 2010). Bu çalışmada özellikle Yeşilırmak Havzası'nda gözlenen eğilimler söz konusu mekanizmanın etkili olabileceğini düşündürmektedir.

Buna karşılık Meriç, Susurluk ve Gediz havzalarındaki istasyonlarda hidrolojik kuraklık ile su kalitesi indeksleri arasında istatistiksel olarak anlamlı ilişkiler belirlenmemiştir. Bu durum, söz konusu havzalarda su kalitesinin kısa süreli hidrolojik değişimlerden daha az etkilenmesi veya su kalitesinin oluşumunda jeolojik yapı, doğal iyonik bileşim ve arazi kullanım özelliklerinin daha baskın rol oynamasıyla açıklanabilir. Özellikle tüm istasyonlarda SAR ve %Na değerlerinin düşük risk sınıfında bulunması, çalışma alanlarında sulama suyu açısından sodyum tehlikesinin genel olarak düşük olduğunu ve hidrolojik kuraklığın bu göstergeler üzerinde belirgin bir değişime neden olmadığını göstermektedir.

Sakarya Havzası'nda yer alan Yenice istasyonunda SDI ile %Na arasında belirlenen pozitif yönlü ve istatistiksel olarak anlamlı korelasyon, diğer istasyonlardan farklı bir davranış ortaya koymuştur. Bununla birlikte bu ilişkinin yalnızca kuraklık etkisiyle açıklanması mümkün değildir. Havzanın hidrolojik yapısı, yeraltı suyu katkısı, tarımsal faaliyetler ve suyun iyonik bileşimi birlikte değerlendirildiğinde, bu sonucun yerel çevresel koşulların etkisini yansıttığı düşünülmektedir. Bu nedenle hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkilerin değerlendirilmesinde her havzanın kendine özgü özelliklerinin dikkate alınması gerekmektedir.

Literatürde de benzer şekilde, aynı kuraklık koşullarının farklı havzalarda farklı su kalitesi tepkilerine neden olabileceği belirtilmektedir. Mosley (2015) ve Qiu vd. (2023), hidrolojik kuraklığın su kalitesi üzerindeki etkilerinin havzanın fiziksel özellikleri, kirletici kaynakları ve hidrolojik süreçlerine bağlı olarak değişebileceğini ifade etmektedir. Bu çalışmada elde edilen bulgular da söz konusu araştırmaları desteklemekte ve hidrolojik kuraklığın su kalitesini etkileyen faktörlerden yalnızca biri olduğunu göstermektedir. Su kalitesi; hidrolojik süreçlerin yanı sıra jeolojik yapı, yeraltı suyu katkısı, arazi kullanımı ve kirletici yükleri gibi çok sayıda çevresel faktörün ortak etkisi altında şekillenmektedir. Bu

nedenle hidrolojik kuraklığın tek başına su kalitesindeki değişimleri açıklaması mümkün değildir.

Genel olarak değerlendirildiğinde, farklı havzalarda elde edilen sonuçlar hidrolojik kuraklığın su kalitesi üzerinde tek tip bir etki oluşturmadığını göstermektedir. Bu nedenle kuraklık–su kalitesi ilişkisinin değerlendirilmesinde yalnızca hidrolojik göstergelerin kullanılması yeterli olmayıp, havzaların doğal özellikleri, arazi kullanımı ve çevresel baskılar birlikte ele alınmalıdır. Böylece su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimine yönelik daha gerçekçi ve havzaya özgü değerlendirmeler yapılabilecektir.

Bu çalışmanın önemli katkılarından biri, hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin Meriç, Sakarya, Yeşilırmak, Susurluk ve Gediz havzalarında birlikte değerlendirilmesi ve CCME WQI, SAR ile %Na gibi farklı su kalite göstergelerinin aynı çalışma kapsamında karşılaştırılmasıdır. Bu yönüyle çalışma, tek havza veya tek su kalite göstergesine odaklanan önceki araştırmalara kıyasla daha bütüncül bir değerlendirme sunmaktadır.

Korelasyon, regresyon ve trend analizlerinin birlikte değerlendirilmesi, hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin tek bir istatistiksel yöntemle açıklanamayacağını ortaya koymuştur. Bu nedenle gelecekte yapılacak çalışmalarda daha uzun gözlem serilerinin kullanılması, farklı su kalite indekslerinin birlikte değerlendirilmesi ve havza bazlı yaklaşımların benimsenmesi, kuraklık–su kalitesi etkileşiminin daha kapsamlı biçimde ortaya konulmasına katkı sağlayacaktır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı hidrolojik ve çevresel özelliklere sahip Meriç, Sakarya, Yeşilırmak, Susurluk ve Gediz havzalarında hidrolojik kuraklık ile tarımsal sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkiler Akım Kuraklık İndeksi (SDI), Sodyum Adsorpsiyon Oranı (SAR), Sodyum Yüzdesi (%Na) ve Kanada Çevre Bakanları Konseyi Su Kalitesi İndeksi (CCME WQI) kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tanımlayıcı istatistikler, normallik testleri, korelasyon analizleri, Mann–Whitney U testi, doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon analizleri ile Mevsimsel Mann–Kendall (SMK) trend analizi ve Sen Eğimi yöntemi birlikte değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin tüm havzalarda benzer şekilde gerçekleşmediğini ve istasyonlar arasında önemli farklılıklar bulunduğunu göstermiştir. Korelasyon analizleri sonucunda istasyonların büyük bölümünde SDI ile SAR, %Na ve CCME WQI arasında istatistiksel olarak anlamlı doğrusal ilişkiler belirlenmemiştir. Buna karşın Sakarya Nehri Yenice istasyonunda SDI ile %Na arasında anlamlı pozitif bir ilişki tespit edilmiştir. Ayrıca Mann–Whitney U testi sonuçları, Yeşilırmak Havzası'ndaki Durucasu HES ve Sütlüce istasyonlarında kurak ve normal dönemler arasında su kalitesi açısından istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar bulunduğunu göstermiştir. Özellikle Yeşilırmak Havzası'ndaki Durucasu HES ve Sütlüce istasyonlarında belirlenen bu farklılıklar, kurak ve normal dönemlerde CCME WQI değerlerinin değişebildiğine işaret etmektedir. Ancak korelasyon analizlerinde anlamlı ilişkilerin belirlenmemesi, bu farklılığın sürekli ve doğrusal bir ilişki olarak değerlendirilmemesi gerektiğini göstermektedir.Bu sonuçlar, hidrolojik kuraklığın su kalitesi üzerindeki etkisinin doğrusal bir ilişki şeklinde ortaya çıkmayabileceğini; bunun yerine havzaya ve döneme bağlı olarak farklı biçimlerde gözlenebileceğini göstermektedir.

Havza bazında değerlendirildiğinde, istasyonlar arasında farklı sonuçların ortaya çıktığı görülmüştür. Meriç Havzası'ndaki Ergene Uzunköprü ve Tunca Suakacağı istasyonlarında SDI ile su kalitesi göstergeleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki belirlenmemiştir. Sakarya Havzası'nda ise Yenice istasyonunda SDI ile %Na arasında pozitif ve anlamlı bir ilişki tespit edilmiş, Doğançay istasyonunda ise anlamlı bir ilişki görülmemiştir. Yeşilırmak Havzası'ndaki Durucasu HES ve Sütlüce istasyonlarında Mann–Whitney U testi sonucunda SDI ile CCME WQI arasında anlamlı farklılıklar belirlenmiştir. Susurluk ve Gediz havzalarındaki istasyonlarda ise SDI ile incelenen su kalitesi göstergeleri arasında anlamlı bir

ilişki saptanmamıştır. Bu sonuçlar, hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin havza ve istasyon koşullarına göre değişebildiğini göstermektedir.

Doğrusal, logaritmik ve üstel regresyon modellerinin karşılaştırılması, hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin farklı istasyonlarda farklı matematiksel davranışlar gösterebildiğini ortaya koymuştur. Bazı istasyonlarda doğrusal model daha yüksek açıklayıcılık sağlarken, bazı istasyonlarda logaritmik veya üstel modeller nispeten daha iyi performans göstermiştir. Bununla birlikte modeller birlikte değerlendirildiğinde, hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin tüm istasyonlarda geçerli tek bir fonksiyonel yapı ile açıklanamadığı, aksine havza özelliklerine bağlı olarak değişen karmaşık bir karakter sergilediği belirlenmiştir.

Mevsimsel Mann–Kendall trend analizi ve Sen Eğimi yöntemi sonuçları, hidrolojik kuraklık ve su kalitesinin zamansal eğilimlerinin de istasyonlara göre farklılık gösterdiğini ortaya koymuştur. SDI serilerinde Sakarya Nehri Doğançay ve Yeşilırmak Nehri Sütlüce istasyonlarında anlamlı artan eğilim belirlenirken, CCME WQI açısından yalnızca Yeşilırmak Nehri Sütlüce istasyonunda anlamlı azalan eğilim tespit edilmiştir. Bu durum, hidrolojik olarak daha nemli veya akımın arttığı dönemlerde dahi su kalitesinin her zaman iyileşmeyebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki ilişkinin yalnızca akım değişimleriyle açıklanması mümkün olmayıp, bu ilişkinin jeolojik yapı, hidrojeokimyasal özellikler, arazi kullanımı, tarımsal faaliyetler ve antropojenik baskılar gibi çok sayıda çevresel faktör tarafından şekillendiği anlaşılmaktadır.

Çalışmada kullanılan su kalite göstergeleri de farklı davranışlar sergilemiştir. SDI kısa dönemli akım değişimlerini yansıtırken, SAR ve %Na gibi iyon temelli göstergelerin daha çok havzanın jeolojik yapısı ve hidrojeokimyasal süreçlerinden etkilendiği belirlenmiştir. Buna karşılık çok parametreli bir indeks olan CCME WQI'nin bazı istasyonlarda hidrolojik değişimlerle diğer göstergelere kıyasla farklı bir tepki gösterebildiği görülmüştür. Bu durum, kuraklık–su kalitesi ilişkisinin değerlendirilmesinde çok parametreli indekslerin kullanılmasının daha kapsamlı bilgiler sağlayabileceğini göstermektedir.

Bu araştırmanın önemli katkılarından biri, hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesinin Meriç, Sakarya, Yeşilırmak, Susurluk ve Gediz havzalarında aynı yöntemsel çerçevede karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesidir. Literatürde bu iki konunun birlikte ele alındığı çalışmalar bulunmasına rağmen, uzun süreli akım verilerine dayalı SDI ile SAR, %Na

ve CCME WQI gibi farklı su kalite göstergelerinin aynı çalışma kapsamında ve birden fazla havzada birlikte değerlendirilmesine yönelik çalışmaların daha sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durumun, uzun süreli ve sürekli akım verilerine duyulan gereksinim, su kalitesi gözlemlerinin farklı dönemlerde ve sınırlı sayıda bulunması ve iki veri setinin ortak dönemlerde eşleştirilmesindeki güçlüklerle ilişkili olduğu değerlendirilmektedir. Bu çalışmada farklı hidrolojik ve çevresel özelliklere sahip havzaların aynı analiz yaklaşımıyla incelenmesi, kuraklık–su kalitesi ilişkisinin havza ve istasyonlara göre değişimini ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Su kalitesi verilerinin belirli dönemlerle sınırlı olması ve SDI ile su kalitesi verilerinin yalnızca ortak gözlem aylarında eşleştirilebilmesi, istasyonlardaki örneklem sayılarının sınırlı kalmasına neden olmuştur. Bu durum, özellikle istasyon bazında yapılan istatistiksel analizlerin açıklayıcılığını sınırlandırmış olabilir. Ayrıca aylık gözlem verileri, ani yağışlar ve kısa süreli hidrolojik olaylara bağlı yüksek frekanslı su kalitesi değişimlerini tam olarak yansıtmayabilir. Çalışmada doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon modelleri karşılaştırılmış olmakla birlikte, makine öğrenmesi tabanlı veya daha gelişmiş doğrusal olmayan tahmin modelleri kullanılmamıştır. Elde edilen sonuçlar incelenen istasyonlara özgü olup, tüm Türkiye için doğrudan genelleme yapılmasına olanak vermemektedir.

Araştırma hipotezleri değerlendirildiğinde, SDI ile sulama suyu kalite göstergeleri arasındaki ilişkilerin tüm istasyonlarda benzer olmadığı belirlenmiştir. İstasyonların büyük bölümünde anlamlı ilişki saptanmamasına karşın, Sakarya Nehri Yenice istasyonunda SDI ile %Na arasında anlamlı doğrusal ilişki bulunmuş, ayrıca Yeşilırmak Havzası'ndaki Durucasu HES ve Sütlüce istasyonlarında kurak ve normal dönemler arasında su kalitesinin anlamlı biçimde farklılaştığı belirlenmiştir. Bu bulgular, hidrolojik kuraklık ile sulama suyu kalitesi arasındaki ilişkinin havzaya ve istasyona özgü olduğunu göstermekte olup, alternatif hipotezin yalnızca belirli istasyonlar açısından desteklendiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma tarımsal sulama suyu yönetiminde kuraklık dönemleri için tüm havzalara uygulanabilecek tek tip bir yaklaşımın bulunmadığını göstermektedir. Su kalitesinin hidrolojik kuraklığa verdiği tepki, her havzanın hidrolojik ve jeolojik özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu nedenle sürdürülebilir su kaynakları yönetiminde genel değerlendirmeler yerine havza ölçeğinde, yerel koşulları dikkate alan yönetim stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda daha uzun gözlem dönemlerinin kullanılması, farklı kuraklık indekslerinin birlikte değerlendirilmesi, olay bazlı

izleme çalışmalarının gerçekleştirilmesi ve gelişmiş modelleme yaklaşımlarının uygulanması, hidrolojik kuraklık ile su kalitesi arasındaki etkileşimin daha ayrıntılı ortaya konulmasına ve iklim değişikliğine uyum sağlayan sürdürülebilir su yönetimi stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). *Water quality indices*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2010-0-69472-7

Aksoy, H., Eriş, E., Çetin, M., Önöz, B., Yüce, M. İ., Selek, B., Aksu, H., Burgan, H. İ., & Eşit, M. (2018). Gediz Havzasında kuraklık analizi. *Uluslararası Katılımlı Türkiye Ulusal Jeodezi Jeofizik Birliği (TUJJB) Bilimsel Kongresi Bildiri Kitabı* (ss. 28–31). İzmir, Türkiye.

Alkan, Ç. (2021). *Porsuk Çayı Havzasında iklim değişikliğinin kuraklığa ve buğday verimine etkisinin belirlenmesi* (Doktora tezi). Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi.

Alkan, Ç., & Meral, R. (2024). *Investigation of Water Quality of the Karasu River in Bilecik Province in terms of Agricultural Irrigation*. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi, 21*(4), 1001–1016. https://doi.org/10.33462/jotaf.1400172

Apodaca, L. E., Mueller, D. K., & Garcia, K. T. (2002). *Total dissolved solids and suspended solids in surface waters of the United States*. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report.

Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). *Water quality for agriculture* (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29, Rev. 1). Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Bayraktar, S. S., & Küçükbayrak, M. (2025). Tarım sektöründe sürdürülebilirlik ve tarımsal sulamanın önemi. *TYB Akademi, 43*, 154–168.

Bilgin, A. (2018). *Evaluation of surface water quality by using Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) method and discriminant analysis method: A case study Coruh River Basin*. *Environmental Monitoring and Assessment, 190*, 554. https://doi.org/10.1007/s10661-018-6927-5

Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., & Tozer, R. G. (1970). A water quality index—Do we dare? *Water and Sewage Works, 117*(10), 339–343.

Calzadilla, A., Rehdanz, K., & Tol, R. S. J. (2011). Water scarcity and the impact of improved irrigation management: A computable general equilibrium analysis. *Agricultural Economics, 42*(3), 305–323. https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.2010.00516.x

Canadian Council of Ministers of the Environment. (2001). *Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME Water Quality Index 1.0 – User's manual*. In *Canadian Environmental Quality Guidelines*. Winnipeg, MB: Canadian Council of Ministers of the Environment.

Choi, J., Kim, H., Cho, B., Park, S., Lee, M., Lee, B., & Kang, U. (2023). *A study on the selection of the total pollution load management at tributaries by evaluation of water quality volatility: Case study for Chungcheongnam-do*. Journal of Korean Society on Water Environment, 39(5), 377–389. https://doi.org/10.15681/KSWE.2023.39.5.377

Çetin, B., & Kumanlıoğlu, A. (2023). Gediz Nehri Medar Havzası meteorolojik ve hidrolojik kuraklık analizleri. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 25*(73), 167–180. https://doi.org/10.21205/deufmd.2023257314

Deger, İ. H., Yüce, M. İ., & Eşit, M. (2023). *An Investigation of Hydrological Drought Characteristics in Kızılırmak Basin, Türkiye: Impacts and Trends*. Bitlis Eren University Journal of Science and Technology, 12(1), 126–139. https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1200742

Demir, V., Ünlü, A., & Erşahin, S. (2016). Assessment of irrigation water quality of Murat River (Eastern Turkey). *Environmental Monitoring and Assessment, 188*, 1–15.

Dede, Ö. T., & Sezer, M. (2017). Aksu Çayı su kalitesinin belirlenmesinde Kanada su kalitesi indeksi modelinin uygulanması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 32*(3), 909–917. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.337643

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2019). *Türkiye su kaynakları*. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. https://www.dsi.gov.tr/sayfa/detay/754

Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. (2022). *DSİ 11. Bölge Müdürlüğü Nehir Debi Bilgi Sistemi*.

Eser Mühendislik Müşavirlik A.Ş. (2014). *DSİ 02 Bölge Gediz Havzası yeraltısuyu planlaması hidrojeolojik etüt ara raporu*.

Faures, J. M., Svendsen, M., & Turral, D. (2007). Reinventing irrigation. In D. Molden (Ed.), *Water for food, water for life: A comprehensive assessment of water management in agriculture*. Earthscan & International Water Management Institute.

Gao, L., Zhang, Y., & Ding, S. (2016). Impact of drought on river water quality in a changing climate. *Science of the Total Environment, 566–567*, 1022–1031. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.211

Gibbons, J. D., & Chakraborti, S. (2011). *Nonparametric statistical inference* (5th ed.). CRC Press.

Güher, H., & Demir, Y. (2018). Tunca Nehri'nin (Edirne) Microcrustacea (Crustacea: Cladocera, Copepoda) faunası ve mevsimsel dağılımı. *Journal of Limnology and Freshwater Fisheries Research, 4*(2), 75–84. https://doi.org/10.17216/limnofish.363113

Gümüş, V. (2017). Akım Kuraklık İndeksi ile Asi Havzasının hidrolojik kuraklık analizi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 5*(1), 65–73.

Gümüş, V., & Algın, H. M. (2017). Meteorological and hydrological drought analysis of the Seyhan–Ceyhan River Basins, Turkey. *Meteorological Applications, 24*(1), 62–73. https://doi.org/10.1002/met.1605

Gündoğdu, A., & Turhan, M. (2004). Water pollution and river basin management in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment, 92*, 131–145.

Gürsoy Haksevenler, B. H., & Ayaz, S. (2021). Noktasal ve yayılı kirletici kaynaklarının yüzeysel su kalitesi üzerinde etkisi: Alaşehir Çayı alt havzası örneği. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11*(4), 1258–1268. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.882693

Hakyemez, C. (2019). *Su: Yeni elmas*. Türkiye Sınai Kalkınma Bankası Yayınları.

Heim, R. R., Jr. (2002). A review of twentieth century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society, 83*(8), 1149–1165. https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1149

Hepsağ, E. (2003). *Köyceğiz–Dalyan lagün havzası su kaynaklarının su kalitesi* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.

Hirsch, R. M., Slack, J. R., & Smith, R. A. (1982). *Techniques of trend analysis for monthly water quality data*. Water Resources Research, 18(1), 107–121. https://doi.org/10.1029/WR018i001p00107

Hong, X., Guo, S., Zhou, Y., & Xiong, L. (2014). Uncertainties in assessing hydrological drought using Streamflow Drought Index for the Upper Yangtze River Basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 29*(2), 605–616. https://doi.org/10.1007/s00477-014-0972-3

Horton, R. K. (1965). An index number system for rating water quality. *Journal of Water Pollution Control Federation, 37*(3), 300–306.

IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Jo, B. G., Lim, J., Lee, J.-H., & Kim, Y. D. (2024). Research on the index calculation method for the impact of drought on water quality in the Nakdong River, Korea. *Hydrology, 11*(11), 190. https://doi.org/10.3390/hydrology11110190

Kahraman, A. C., & Özkul, M. (2018). *Ergene Havzası Koruma Eylem Planı durum değerlendirme raporu II*. Marmara Belediyeler Birliği.

Kale, M. M., & Duman, N. (2024). Bendimahi Çayı (Van Gölü Kapalı Havzası) hidrolojik kuraklık analizi. *Fırat University Journal of Social Sciences, 34*(2), 499–516.

Kalyoncu, H., Barlas, M., & Ertan, O. O. (2005). Water quality assessment of streams in Turkey. *Turkish Journal of Zoology, 29*, 33–41.

Kantarcı, M. D. (2005). Trakya'nın ekolojik özellikleri ve stratejik bölgesel planlama gerekliliği. *Planlı Dönemde Trakya'da Sanayileşme ve Çevre Sempozyumu IV*.

Karakaya, N., Akça, S., & Demir, Y. (2018). Meriç Nehri'nde pestisit kalıntılarının izlenmesi. *Trakya University Journal of Natural Sciences, 19*(1), 55–63.

Katipoğlu, O. M., Yeşilyurt, S. N., & Dalkılıç, H. Y. (2022). *Yeşilırmak havzasındaki hidrolojik kuraklıkların Mann–Kendall ve Yenilikçi Şen yöntemi ile trend analizi*. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 12(2), 422–442. https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.1026893

Kazi, T. G., Arain, M. B., Jamali, M. K., Jalbani, N., Afridi, H. I., Sarfraz, R. A., Baig, J. A., & Shah, A. Q. (2009). Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study. *Ecotoxicology and Environmental Safety, 72*(2), 301–309. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2008.02.024

Kumanlıoğlu, A., & Fıstıkoğlu, O. (2019). Yukarı Gediz Havzası yağışlarının meteorolojik kuraklık analizleri. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 21*(62), 509–523. https://doi.org/10.21205/deufmd.2019216216

Kumanlıoğlu, A. A. (2020). *Hydrological droughts and runoff trends of the Demirköprü Dam Reservoir Basin on Gediz River, Turkey*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 22(66), 793–800. https://doi.org/10.21205/deufmd.2020226614

Kurtulmuş, F. (2006). *Su kirliliği ve çevresel etkileri*. Nobel Yayın Dağıtım.

Li, P., Tian, R., Xue, C., & Wu, J. (2020). Progress, opportunities, and key fields for groundwater quality research under the impacts of climate change. *Environmental Science and Pollution Research, 27*(24), 29810–29829. https://doi.org/10.1007/s11356-020-08749-2

Linsley, R. K., Jr., Kohler, M. A., & Paulhus, L. H. (1958). *Hydrology for engineers*. McGraw-Hill.

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology, 391*(1–2), 202–216. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012

Mishra, P., Pandey, C. M., Singh, U., Gupta, A., Sahu, C., & Keshri, A. (2019). Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Annals of Cardiac Anaesthesia, 22*(1), 67–72. https://doi.org/10.4103/aca.ACA_157_18

Modi, R. (2024). *Investigating river water quality assessment through non-parametric analysis: A case study of the Godavari River in India*. Environmental Quality Management, 33(3), 239–264. https://doi.org/10.1002/tqem.22117

Mosley, L. M. (2015). Drought impacts on the water quality of freshwater systems: Review and integration. *Earth-Science Reviews, 140*, 203–214. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.11.010

Nalbantis, I. (2008). Evaluation of a hydrological drought index. *European Water, 23–24*, 67–77.

Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management, 23*, 881–897. https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1

Orman ve Su İşleri Bakanlığı. (2013). *Gediz Havzası Koruma Eylem Planı*. Ankara.

Orman ve Su İşleri Bakanlığı. (2018). *Susurluk Havzası Taşkın Yönetim Planı*. Ankara.

ORSAM (Ortadoğu Stratejik Araştırmalar Merkezi). (2011). *Meriç Nehri Havzası su yönetiminde uluslararası iş birliği zorunluluğu* (Rapor No. 44). Ankara.

Özfidaner, M., Şapolyo, D., & Topaloğlu, F. (2018). Seyhan Havzası akım verilerinin hidrolojik kuraklık analizi. *Toprak Su Dergisi, 7*(1), 57–64. https://doi.org/10.21657/topraksu.410140

Qiu, J., Shen, Z., & Xie, H. (2023). Drought impacts on hydrology and water quality under climate change. *Science of the Total Environment, 858*, 159854. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159854

Richards, L. A. (Ed.). (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. USDA Agriculture Handbook No. 60.

Rocchini, R., & Swain, L. G. (1995). *The British Columbia Water Quality Index*. Water Quality Branch, Environmental Protection Department, British Columbia Ministry of Environment, Lands and Parks.

Saleh, A., Al-Ruwaih, F., & Shehata, M. (1999). Hydrochemical processes operating within the main aquifers of Kuwait. *Journal of Hydrology, 217*(1–2), 129–145. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00269-2

Schwarzenbach, R. P., Escher, B. I., Fenner, K., Hofstetter, T. B., Johnson, C. A., von Gunten, U., & Wehrli, B. (2010). The challenge of micropollutants in aquatic systems. *Science, 313*(5790), 1072–1077. https://doi.org/10.1126/science.1127291

Sen, P. K. (1968). *Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau*. Journal of the American Statistical Association, 63(324), 1379–1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

Şahin, M. (2018). *Porsuk Çayı'nın su kalite indekslerine göre değerlendirilmesi ve baraj gölü trofik seviyesinin belirlenmesi* (Doktora tezi). Anadolu Üniversitesi.

Şen, Z. (2015). *İklim değişikliği ve su kaynakları*. Su Vakfı Yayınları.

Tabari, H., Nikbakht, J., & Hosseinzadeh, T. P. (2012). Hydrological drought assessment in northwestern Iran based on Streamflow Drought Index (SDI). *Water Resources Management, 27*(1), 137–151. https://doi.org/10.1007/s11269-012-0173-3

Taşkaya, A. (2004). *Su kirliliği ve kontrolü*. Nobel Yayın Dağıtım.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2023). *Susurluk Havzası Kuraklık Yönetim Planı: Cilt I – Havzanın tanıtılması ve kuraklık analizleri*. Ankara.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2023a). *Sakarya Havzası Nehir Havza Yönetim Planı*. Ankara.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2023b). *Sakarya Havzası Nehir Havza Yönetim Planı hazırlanması projesi: Stratejik çevresel değerlendirme taslak raporu*. Ankara.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü. (2023c). *Sakarya Havzası Nehir Havza Yönetim Planı raporu*. Ankara.

Taylan, D., & Toker, F. (2023). Uşak ili çevresi için hidrolojik kuraklık analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11*(1), 1–21.

T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı. (2017). *Ulusal Kuraklık Yönetimi Strateji Belgesi ve Eylem Planı (2017–2023)*. Ankara.

T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı. (2022). *Tarımsal sulama suyu kalitesi rehberi*. Su Yönetimi Genel Müdürlüğü.

Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2015). DrinC: A software for drought analysis based on drought indices. *Earth Science Informatics, 8*, 697–709. https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y

Todd, D. K. (1959). *Ground Water Hydrology*. John Wiley & Sons.

Türkeş, M., & Tatlı, H. (2010). Kuraklık ve yağış etkinliği indislerinin çölleşmenin belirlenmesi, nitelenmesi ve izlenmesindeki rolü. *Çölleşme ile Mücadele Sempozyumu Bildirileri* (17–18 Haziran 2010, Çorum).

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu Marmara Araştırma Merkezi. (2018). *Gediz Havzası Nehir Havza Yönetim Planı nihai raporu*.

Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., & Dobhal, R. (2013). Water quality assessment in terms of Water Quality Index. *American Journal of Water Resources, 1*(3), 34–38. https://doi.org/10.12691/ajwr-1-3-3

Uddin, M. G., Nash, S., & Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators, 122*, 107218. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218

Vörösmarty, C. J., McIntyre, P. B., Gessner, M. O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S. E., Sullivan, C. A., Reidy Liermann, C., & Davies, P. M. (2010). *Global threats to human water security and river biodiversity*. *Nature, 467*(7315), 555–561. https://doi.org/10.1038/nature09440

Wang, L., Han, X., Zhang, Y., Zhang, Q., Wan, X., Liang, T., Song, H., Bolan, N., Shaheen, S. M., White, J. R., *et al.* (2023). *Impacts of land uses on spatio-temporal variations of seasonal water quality in a regulated river basin, Huai River, China*. Science of the Total Environment, 857, 159584. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159584

Whitehead, P. G., Wilby, R. L., Battarbee, R. W., Kernan, M., & Wade, A. J. (2009). A review of the potential impacts of climate change on surface water quality. *Hydrological Sciences Journal, 54*(1), 101–123. https://doi.org/10.1623/hysj.54.1.101

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). *Understanding the drought phenomenon: The role of definitions*. Westview Press.

Wilcox, L. V. (1955). *Classification and use of irrigation waters*. USDA Circular No. 969.

Yıldız, D., Sağlam, C., & Güler, Ç. (2016). Kızılırmak Nehri'nin fiziksel su kalitesi parametrelerinin mevsimsel değişimi. *Su Bilimleri ve Teknolojisi Dergisi, 7*(1), 33–44.

Yılmaz, M., & Tosunoğlu, F. (2023). *Assessing the main drivers of low flow series in Turkey*. Natural Hazards, 115(3), 2917–2946. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05621-3

Zandbergen, P. A., & Hall, K. J. (1998). Analysis of the British Columbia Water Quality Index for watershed managers: A case study of two small watersheds. *Water Quality Research vdurnal of Canada, 33*(4), 519–549. https://doi.org/10.2166/wqrj.1998.030

Zar, J. H. (2010). *Biostatistical analysis* (5th ed.). Pearson Prentice Hall.

Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., & Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews, 19*(1), 333–349. https://doi.org/10.1139/a11-013