



KURAKLIK ANALİZİNE DAYALI ENDÜSTRİYEL SU TASARRUFU POTANSİYELİNİN HESAPLANMASI: ANTALYA HAVZASI ÖRNEĞİ

Alperen KIR^{1*}, Mehmet KİTİŞ²

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, Türkiye

²Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Öz

*Endüstri Su Tüketimi,
İklim Değişikliği,
Kuraklık Analizi,
Mevcut En İyi Teknik
(MET),
Standart Yağış İndeksi
(SPI).*

Bu çalışma, Antalya Havzası'nda iklim değişikliği nedeniyle meydana gelebilecek kuraklık şiddetini hesaplamaktadır. Ayrıca, havzada faaliyet gösteren endüstrilerin kuraklıktan en az şekilde etkilenebilmesi için alması gereken önlemleri belirlemeyi amaçlamaktadır. Çalışmada ilk olarak, Kaliforniya Üniversitesi, Santa Barbara (UCSB) - İklim Tehlikesi Grubu (CHG) / İklim Tehlikeleri Grubu İstasyon verileriyle Kızılötesi Yağış (CHIRPS) / 5 Günlük Süre (PENTAD) uydu verisi kullanılarak Standart Yağış İndeksi (SPI) ile 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık dönemler için kuraklık analizleri yapılmıştır. Bu analizler, 1981-2023 tarihlerinde bölgede oluşmuş olan kuraklık dönemlerini ve şiddetlerini belirlemektedir. Çalışmanın diğer aşamalarında ise Antalya Havzası'ndaki üç farklı sektörde faaliyet gösteren tesislerde, kuraklığın oluşturduğu olumsuz etkileri azaltmak amacıyla her bir tesise üçer adet mevcut en iyi teknik (MET) uygulandığı varsayılmıştır. Bu MET'lerin tesisler tarafından uygulanması durumunda elde edilebilecek tasarruf oranları hesaplanmıştır. Tesis 1'de 3 farklı MET uygulandığında ortalama %20,97 su kazanımı, Tesis 2'de farklı 3 MET uygulandığında ortalama %0,64 su kazanımı ve Tesis 3'te farklı 3 MET uygulandığında ortalama %10,86 su kazanımı sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, tesislerden toplamda 9 farklı MET'ten elde edilebilecek ortalama potansiyel su tasarrufu yaklaşık %10,82 olarak belirlenmiştir. Böylelikle, su tüketiminin azaltılması, hem çevresel sürdürülebilirliğe hem de ekonomik verimliliğe önemli katkılar sağlayacaktır.

ESTIMATION OF INDUSTRIAL WATER CONSERVATION POTENTIAL BASED ON DROUGHT ANALYSIS: A CASE STUDY OF THE ANTALYA BASIN

Keywords

Abstract

*Industrial Water
Consumption,
Climate Change,
Drought Analysis,
Best Available Technique
(BAT),
Standardized
Precipitation Index (SPI).*

This study calculates the severity of droughts that may occur in the Antalya Basin due to climate change. It also aims to determine the measures that industries operating in the basin should take to minimize the impacts of drought. First, drought analyses were conducted using the Standardized Precipitation Index (SPI) for 1, 3, 6, 9, and 12-month periods based on Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS/PENTAD), provided by the Climate Hazards Group (CHG) at the University of California, Santa Barbara (UCSB). These analyses identify the drought periods and their severities in the region from 1981 to 2023. In the subsequent stages of the study, three Best Available Techniques (BAT) were assumed to be applied to facilities operating in three different sectors within the Antalya Basin to mitigate the adverse effects of drought. The potential savings from the implementation of these BATs were calculated. When three different BATs were applied in Facility 1, an average water savings of 20.97% was achieved; in Facility 2, the application of three different BATs resulted in an average savings of 0.64%; and in Facility 3, three different BATs provided an average savings of 10.86%. The overall potential average water savings from the nine BATs applied across all facilities was approximately 10.82%. These findings indicate that reducing water consumption will contribute significantly to both environmental sustainability and economic efficiency.

Alıntı / Cite

Kır, A., Kitiş, M., (2025). Kuraklık Analizine Dayalı Endüstriyel Su Tasarrufu Potansiyelinin Hesaplanması: Antalya Havzası Örneği, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 13(3), 745-761.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. Kır, 0000-0002-3304-0047
M. Kitiş, 0000-0002-6836-3129

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date	06.12.2024
Revizyon Tarihi / Revision Date	10.06.2025
Kabul Tarihi / Accepted Date	25.06.2025
Yayın Tarihi / Published Date	30.09.2025

* İlgili yazar / Corresponding author: alperenkir@sdu.edu.tr, +90-554-940-4245

ESTIMATION OF INDUSTRIAL WATER CONSERVATION POTENTIAL BASED ON DROUGHT ANALYSIS: A CASE STUDY OF THE ANTALYA BASIN

Alperen KIR^{1†}, Mehmet KITİS²,

¹Suleyman Demirel University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Environmental Engineering, Isparta, Turkey

²Suleyman Demirel University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Environmental Engineering, Isparta, Turkey

Highlights

- Assessment of Drought Severity Due to Climate Change Using SPI Analysis
 - Implementation of Best Available Techniques (BAT) for Drought Mitigation in the Food Sector
 - Sustainable Water Management for Environmental and Economic Benefits
-

Purpose and Scope

This research aims to evaluate the severity of droughts in the Antalya Basin using SPI analysis and to propose sector-specific Best Available Techniques (BAT) to minimize the impact of drought on industrial water consumption, particularly in the food sector.

Design/methodology/approach

This study evaluates the severity and frequency of droughts in the Antalya Basin from 1981 to 2023 using SPI analysis with CHIRPS satellite data, highlighting the region's vulnerability to climate change. To mitigate drought impacts, sector-specific Best Available Techniques (BAT) are proposed, particularly for the food sector, to promote sustainable water management. These efforts demonstrate the significant potential of BAT implementation to enhance both environmental sustainability and economic efficiency.

Research Limitations/Implications

The research is limited by the availability and resolution of long-term precipitation data, as well as the assumptions made in estimating water savings from Best Available Techniques (BAT) without direct implementation or field verification. These limitations imply that while the findings provide valuable insights, further studies incorporating real-world applications and broader industrial sectors are necessary to validate and expand the implications of the proposed methods.

Findings

In the course of this work, it was found that the Antalya Basin has experienced significant drought periods and varying severities between 1981 and 2023, as determined through SPI analysis. Furthermore, implementing sector-specific Best Available Techniques (BAT), particularly in the food sector, demonstrated potential water savings of 20.97% in Facility 1, 0.64% in Facility 2, and 10.86% in Facility 3, with an overall average savings of 10.82%, highlighting the substantial contribution of BATs to sustainable water management and mitigating the adverse impacts of drought.

Originality

This paper combines SPI-based drought analysis with the evaluation of sector-specific Best Available Techniques (BAT) to mitigate industrial water consumption impacts, particularly in the food sector. It provides valuable insights for policymakers, scientists, and industry stakeholders to enhance water sustainability and resilience to drought in regions like the Antalya Basin.

[†] Corresponding author: alperenkir@sdu.edu.tr, +90-554-940-4245

1. Giriş (Introduction)

Su, canlıların yaşamsal faaliyetlerini sürdürebilmesi ve ülkelerin ekonomik gelişmelerinin sürdürülebilirliği için temel bir kaynak olmaktadır. Ancak, su kaynaklarının sınırlı olması ve dünya genelinde suyun yalnızca %2,5'inin tatlı su olarak kullanılabilir durumda olması (Yang ve Liu, 2020), su yönetimini ve kuraklıkla mücadeleyi kritik hale getirmektedir. İklim değişikliğiyle birlikte, özellikle yarı kurak bölgelerde, kullanılabilir su kaynaklarının azalması ve kuraklık riskinin artması ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. İklim sistemi, doğal döngüler ve antropojenik faaliyetler sonucu sürekli bir değişim göstermektedir. Özellikle, Milankovitch Döngüleri, El Nino ve La Nina gibi okyanus akıntıları ve güneş lekeleri gibi doğal süreçler, iklim üzerinde etkili olurken; insan kaynaklı faaliyetler, iklim değişikliğinin meydana gelme süresini hızlandırmaktadır (Türkeş, 2008).

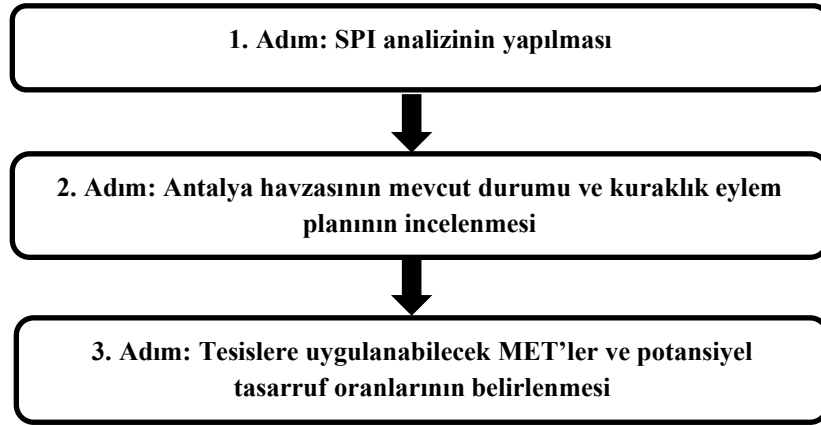
Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından yayınlanan raporlara göre, iklim değişikliği büyük oranda insan faaliyetlerinden kaynaklanmakta olup, bu durum ekstrem hava olaylarının sıklığını artırmaktadır (IPCC, 2013). Küresel sıcaklık artışı ve buzulların erimesiyle, deniz seviyesinin yükselmesi, sıcak hava dalgaları ve şiddetli yağışlar gibi olağanüstü hava olayları dünya genelinde daha sık görülmektedir. Türkiye gibi Akdeniz Havzası'nda yer alan ülkeler, iklim değişikliğinin su kaynakları üzerindeki etkilerini daha yoğun hissetmektedir (Karapınar, 2023). Yapılan araştırmalar, bu bölgede sıcaklıkların artması ve yağışların azalması sonucu kuraklık riskinin arttığını göstermektedir (Bates vd., 2008; Şen vd., 2017). Kuraklık ve endüstriyel su kullanımı arasındaki ilişki, su kaynaklarının azalmasının sanayi üzerindeki olumsuz etkileriyle doğrudan bağlantılıdır. Kuraklık dönemlerinde su temininin azalması, sanayilerin üretim süreçlerini aksatabilir ve üretim maliyetlerini artırabilir (Mekonnen ve Hoekstra, 2016). Suya bağımlı olan enerji üretim tesisleri, özellikle termal ve nükleer santraller, kuraklık dönemlerinde ciddi üretim sorunlarıyla karşı karşıya kalabilir (Flörke vd., 2018). Aynı zamanda tarıma dayalı sektörler, gıda üretiminde su kıtlığı nedeniyle büyük zorluklar yaşamaktadır. Tarımsal üretimin düşmesi, bu sektörlerde dayalı endüstrilerde hammadde kıtlığına neden olabilir ve gıda fiyatlarının artmasına yol açabilir (Kummu vd., 2016). Su kıtlığının yarattığı bu olumsuz etkileri azaltmak için, endüstrilerin su kullanımını daha verimli hale getirecek stratejilere yönelmeleri gerekmektedir. Su tasarrufuna yönelik mevcut en iyi teknikler (MET) gibi yöntemler, hem çevresel sürdürülebilirlik hem de ekonomik verimlilik açısından büyük önem taşımaktadır (Mekonnen ve Hoekstra, 2016). Ayrıca, su kaynaklarının azalması, ülkeleri su tüketimini düzenleyen daha sıkı yasal düzenlemelere yöneltmektedir. Bu da endüstriler üzerinde su tasarrufu konusunda daha yenilikçi çözümler geliştirme baskısını artırmaktadır (Flörke vd., 2018; Kummu vd., 2016).

İklim değişikliği ve buna bağlı olarak su kaynaklarındaki azalma, Türkiye'deki sanayi ve tarım sektörlerini doğrudan etkilemektedir. Bu bağlamda, havza bazlı su yönetimi stratejileri geliştirmek ve sanayi üretiminin su kıtlığıyla başa çıkabilme potansiyelini incelemek büyük önem taşımaktadır. Bugüne kadar yapılan çalışmalar, özellikle hidrolojik havzaların mevcut ve gelecekteki su potansiyelini belirlemeye yönelik analizlerin su güvenliği açısından kritik olduğunu ortaya koymaktadır (Pinarlık, 2023). Gelecekte havzalardaki su potansiyelinin azalması durumunda, endüstrilerin ve tarımsal faaliyetlerin iklim değişikliğine uyum sağlamaya yönelik alacağı önlemler büyük önem arz etmektedir.

Bu çalışmanın amacı, Antalya Havzası'ndaki su potansiyelinde olası azalmaları belirleyerek, havzadaki tarımsal ve endüstriyel tesislerin kuraklık koşullarından en az şekilde etkilenmesi için uygulanabilecek MET'leri tespit etmek ve su tüketiminde tasarruf sağlanmasına yönelik çözüm önerileri sunmaktır. Çalışma, Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü'nün (SYGM) Kuraklık Eylem Planları doğrultusunda yapılmış olup, havzadaki kuraklık şiddetini değerlendirmek için Standart Yağış İndeksi (SPI) kullanılarak gelecekteki su azalma durumu incelenmiş ve oranları hesaplanarak bu azalmaya karşı alınması gereken önlemler önerilmiştir. Bu öneriler, Antalya Havzası'ndaki su kaynaklarının sürdürülebilirliğini sağlamak ve kuraklık etkilerini azaltmak için önemli adımlar olacaktır. Su verimliliğini artıran çözümler, hem endüstriyel hem de tarımsal sektörlerde ekonomik ve çevresel açıdan önemli faydalar sağlayacaktır.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

Bu çalışma temel 4 adımdan oluşmaktadır (Şekil 1). Birinci adımda SPI analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda literatür araştırmaları yapılmış ve analiz için veriler toplanmıştır. İkinci adımda, Antalya havzasının kuraklık eylem planı incelenmiştir. SYGM tarafından hazırlanan raporda elde edilen verilere göre havzadaki olası su azalma miktarları hesaplanmıştır. Üçüncü adımda, havzada su tüketimi açısından risk oluşturabilecek sektörler belirlenmiştir. Bu sektörler arasında, öncelikle su tüketim miktarı en yüksek olan sektör tespit edilmiş ve bu sektörün, yüksek su tüketimi nedeniyle gelecekteki kuraklık riskinden en fazla etkilenme potansiyeline sahip olduğu saptanmıştır. Bu tespiti dayanarak, söz konusu sektöre yönelik özel çalışmalar ve önlemler geliştirilmiştir. Çalışmanın dördüncü ve son adımı ise tesislere uygulanabilecek örnek MET'ler belirlenmiştir. Tarım ve Orman Bakanlığı tarafından belirlenen MET'lerin uygulanması ile elde edilebilecek potansiyel tasarruf oranları hesaplanmıştır. Çalışma yaklaşımı aşağıdaki alt başlıklar altında detaylandırılmıştır.



Şekil 1. Çalışmanın uygulama metodolojisi (Application methodology of the study)

2.1. SPI Analizi (SPI Analysis)

Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI), T.B. McKee vd. tarafından 1993 yılında geliştirilmiş olup, meteorolojik kuraklıkların izlenmesi ve analiz edilmesi amacıyla kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (McKee vd., 1993). Bu indeks, yalnızca yağış verilerine dayalı olarak hesaplanmakta ve belirli bir bölgede belirli bir zaman dilimi içerisinde yaşanan aşırı kurak veya aşırı nemli dönemleri tespit etmeye olanak tanımaktadır (Svoboda vd., 2012; Benny vd., 2024). SPI, farklı zaman ölçeklerinde hesaplanabilmesi nedeniyle kısa ve uzun vadeli kuraklık analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kısa vadede, SPI'nın düşük değerleri toprak nemi ve yüzey akışı gibi değişkenleri etkilerken, uzun vadede yeraltı su seviyeleri ve akarsu debisi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır (Sırdaş, 2002). Pozitif SPI değerleri nemli koşulları, negatif SPI değerleri ise kuraklık koşullarını ifade etmektedir. SPI değeri -1.0'ın altına düştüğünde kuraklık, -2.0'ın altına düştüğünde ise şiddetli kuraklık olarak sınıflandırılmaktadır (Svoboda vd., 2012; Turgu vd., 2015).

SPI hesaplaması, belirli bir zaman dilimindeki yağış miktarının, uzun dönem yağış ortalaması ile karşılaştırılmasına dayanır. Ancak, yağış verileri genellikle normal dağılım göstermediğinden, hesaplama sürecinde öncelikle uygun bir olasılık dağılımı seçilir ve ardından veriler normal dağılıma dönüştürülür. İlk olarak, SPI hesaplamalarında gamma dağılımı, eksik beta dağılımı veya Pearson III dağılımı gibi uygun bir olasılık dağılımı seçilir (McKee vd., 1993; Guttman, 1998; Guttman 1999). Seçilen dağılıma maksimum olabilirlik tahmini yöntemi kullanılarak en iyi şekilde uyum sağlanır (Edwards ve McKee, 1997). Daha sonra, SPI'nın ortalaması sıfır (0) ve standart sapması bir (1) olacak şekilde standart normal dağılıma dönüştürülerek farklı bölgelerde kıyaslanabilir hale getirilir (Lloyd-Hughes ve Saunders, 2002). Bu dönüşüm sayesinde pozitif SPI değerleri nemli koşulları, negatif SPI değerleri ise kuraklık koşullarını temsil etmektedir. SPI'nın en önemli avantajlarından biri, yalnızca yağış verileri ile hesaplanabilmesi ve farklı iklim bölgelerinde güvenilir sonuçlar verebilmesidir (McKee vd., 1993).

Bu çalışmada, kuraklık koşullarını değerlendirmek amacıyla SPI analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma bölgesindeki meteorolojik veriler kullanılarak SPI hesaplanmış ve yağış anomalileri tespit edilmiştir. Bu değerlendirme, bölgesel kuraklık şiddetinin belirlenmesi ve bölgedeki su dengesinin analiz edilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır (Awchi ve Kalyanna, 2017). Çalışma kapsamında, Google Earth Engine (GEE) kullanılarak SPI analizi gerçekleştirilmiştir. Antalya havzasının sınırları, ilgili coğrafi veri setleri kullanılarak belirlenmiş ve tüm analizler bu sınırlar içinde gerçekleştirilmiştir. Havzadaki yağış verileri, İklim Tehlikeleri Grubu İstasyon verileriyle Kızılötesi Yağış (CHIRPS) aylık yağış verilerinden elde edilmiştir. CHIRPS verileri, 0.05° (~5.3 km) mekansal çözünürlüğe sahip olup, 1981 yılından günümüze kadar aylık, dekadal ve günlük ölçeklerde küresel yağış tahmini sunmaktadır. Bu veri seti, Afrika, Güney Amerika ve Asya gibi düşük meteoroloji istasyonu yoğunluğuna sahip bölgelerde yağış analizlerini geliştirmek amacıyla uzaktan algılama ve kara tabanlı ölçümleri birleştirerek üretilmektedir. 0.05° (~5.3 km) çözünürlüğü sayesinde, bölgesel ve yerel ölçeklerde iklimsel analizler için uygun bir veri kaynağı sağlamaktadır. CHIRPS verileri, 1981-2023 yıllarını kapsamakta olup, aylık yağış değerleri üzerinden analiz yapılmıştır. Özellikle kuraklık izleme ve iklim değişikliği çalışmaları için güvenilir bir veri seti olarak kabul edilmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır (Funk vd., 2015).

SPI analizlerinden elde edilen çıktılar, Antalya Havzası Kuraklık Eylem Planı'nda öngörülen su kaynaklarındaki azalma oranları ile karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda, SPI-12 değerleri havzanın uzun vadeli kuraklık eğilimlerini belirlemede önemli bir gösterge olarak kullanılmış ve sanayi tesislerinde uygulanabilecek potansiyel MET'lerin tespit edilmesine katkı sağlamıştır. Özellikle su tüketiminin yoğun olduğu sektörlerde, SPI-12 analizleri ile eylem planında öngörülen su azalma oranları kıyaslanarak sektörel su yönetimi stratejileri geliştirilmiştir. Böylece, SPI

analizlerinden elde edilen veriler ile kuraklık eylem planlarındaki potansiyel azalma oranları çalışma kapsamında su tasarrufu potansiyelinin hesaplanmasında temel girdiler olarak kullanılmıştır.

SPI hesaplamaları için, her bir CHIRPS yağış görüntüsü ilgili yıl ve aya göre etiketlenmiş ve SPI hesaplamasına uygun hale getirilmiştir. Bu veri seti, Antalya havzasındaki uzun vadeli yağış dinamiklerinin detaylı bir şekilde incelenmesine olanak sağlamıştır. Hesaplama sonucunda elde edilen sonuçlarda, negatif SPI değerleri kuraklığı, pozitif SPI değerleri ise nemli koşulları temsil etmektedir. Bu analizler doğrultusunda, bölgedeki yağış anomalileri belirlenmiş ve zaman serisi grafiklerinde SPI değişimleri görselleştirilmiştir. Bu analiz kapsamında, zaman serisi grafikleri oluşturulmuş, x ekseninde tarih, y ekseninde ise SPI değerleri gösterilmiştir. SPI kullanılarak yapılan değerlendirmeler, bölgedeki uzun vadeli yağış eğilimlerinin anlaşılmasına katkı sağlamıştır (Kassaye vd., 2021; Salvacion., 2021; Aktürk vd., 2022). Tablo 1’de SPI kullanılarak aşırı nemlilikten aşırı kuraklığa kadar değişen nemli ve kuraklık sınıflandırması sunulmuştur.

Tablo 1. SPI metoduna göre indis değerleri ve sınıflandırması
(Index values and classification according to the SPI method) (Aktürk vd., 2022)

Sınıflandırma	SPI
Aşırı Kurak	≤ -2
Şiddetli Kurak	$-1.5 \sim -1.99$
Orta Derecede Kurak	$-1 \sim -1.49$
Normal	$-0.99 \sim 0.99$
Orta Derecede Nemli	$1 \sim 1.49$
Çok Nemli	$1.5 \sim 1.99$
Aşırı Nemli	≥ 2

$$g(x) = \frac{x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}, \quad x, \alpha, \beta > 0 \quad (1)$$

Bu denklemler kapsamında, x yağış toplamını, $\Gamma(\alpha)$ Gama fonksiyonunu, α ve β ise sırasıyla şekil ve ölçek parametrelerini ifade etmektedir. Bu parametrelerin en uygun şekilde tahmini için maksimum olabilirlik yöntemi kullanılmaktadır (Yuan ve Zhou, 2008; Bacanlı ve Kargi, 2019). Maksimum olabilirlik yöntemi, büyük veri setlerinde gamma dağılımı parametrelerinin tahmini için güvenilir bir yaklaşımdır (Yuan ve Zhou, 2008). Maksimum olabilirlik tahmini için gerekli parametreler Denklem 2’de gösterilmiştir. Gamma dağılımının kümülatif fonksiyonu, Denklem 3’teki gibi ifade edilmektedir (Sırdaş, 2002).

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right), \beta = \frac{\bar{x}}{a}, A = \ln(\bar{x}) - \sum \frac{\ln(x)}{n} \quad (2)$$

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (3)$$

Bu durumda, $t=x/\beta$ olduğunda, bu eşitlik eksik gamma fonksiyonunu oluşturur (Sırdaş, 2002). Eksik gamma fonksiyonu Denklem 4 ile ifade edilmektedir.

$$G(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (4)$$

Gamma fonksiyonu $x=0$ için tanımsızdır ve yağış dağılımı sıfır değerlerini de içerebilir. Bu durum göz önüne alındığında, toplam olasılık dağılımı Denklem 5’teki gibi yazılabilir (Thom, 1958).

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (5)$$

Burada $H(x)$, toplam olasılık fonksiyonudur ve sıfır yağış olasılığı dahil edilerek hesaplanır. $G(x)$ ise pozitif yağış değerlerinin Gama dağılımını temsil etmektedir. Bu yaklaşım, yağış verilerinin sıfır değerleri içerdiği durumlarda uygun bir modelleme sağlar ve özellikle kuraklık analizlerinde sıkça kullanılan bir yöntemdir (McKee vd., 1993; Yacoub ve Tayfur, 2020). Burada q , yağış serisinde sıfır yağış olan günlerin toplam yağış verisine oranı olarak hesaplanmaktadır. Denklemdaki, m değeri, gözlenen yağış serisinde sıfır yağış olan günlerin sayısını, n ise toplam yağış gözlem sayısını (tüm veri setinin uzunluğu) ifade etmektedir. Bu nedenle, sıfır yağış olasılığı şu şekilde hesaplanır:

$$q = \frac{m}{n} \quad (6)$$

SPI, ters normal dönüşüm yöntemi kullanılarak elde edilmektedir. SPI hesaplamalarında, öncelikle yağış verilerine Gamma dağılımı uygulanmakta ve bu dağılıma karşılık gelen kümülatif olasılık değeri $H(x)$ hesaplanmaktadır. Daha sonra bu olasılık değeri, standart normal dağılıma dönüştürülerek SPI değeri elde edilir. Bu dönüşüm, McKee vd. (1993) tarafından önerilen yöntemle uyumlu olup, Abramowitz ve Stegun (1965) tarafından geliştirilen ters normal dönüşüm yaklaşımı esas alınarak gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda, t dönüşüm değeri, $H(x)$ 'in 0 ile 1 aralığında aldığı değere göre iki farklı şekilde tanımlanmaktadır. Olasılık değeri 0.5'ten küçükse negatif yönlü dönüşüm uygulanmakta, 0.5'ten büyükse pozitif yönlü dönüşümle standart normal dağılıma aktarım sağlanmaktadır (Abramowitz ve Stegun, 1965). Bu yöntem, standart normal dağılımın simetrik yapısını dikkate alan bir yaklaşım olup Denklem 7'de sunulmaktadır.

$$SPI = \begin{cases} -\left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), & t = \sqrt{\ln \frac{1}{(H(x))^2}}, & 0 < H(x) \leq 0.5 \\ +\left(t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right), & t = \sqrt{\ln \frac{1}{(1-H(x))^2}}, & 0.5 < H(x) < 1 \end{cases} \quad (7)$$

Burada, $H(x)$, Gamma dağılımına dayalı olarak hesaplanan kümülatif olasılık fonksiyonudur. Bu değer, ters normal dönüşüme tabi tutularak SPI değeri elde edilir. Denklemde kullanılan sabit katsayılar Abramowitz ve Stegun (1965) tarafından önerilmiş olup, SPI hesaplamalarında yaygın biçimde kullanılmaktadır. SPI hesaplamasında aşağıdaki katsayılar kullanılmaktadır:

- $C_0 = 2.515517, C_1 = 0.802853, C_2 = 0.010328$
- $d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$

Bu sabitler, Wilks (1995) ve McKee vd. (1993) tarafından önerilen katsayılardır ve standart normal dönüşümde yaygın olarak kullanılmaktadır. Geleneksel SPI hesaplamalarında, yağış verileri gamma dağılımına uydurularak standart normal dönüşüm uygulanmaktadır. Ancak, Google Earth Engine (GEE) platformunda doğrudan gamma dağılımına dayalı dönüşüm sağlayan yerleşik bir fonksiyon bulunmamaktadır. GEE ortamında kullanıcı tanımlı istatistiksel dağılımların uygulanması oldukça sınırlıdır ve gamma dağılımının parametrik olarak tanımlanması, özel fonksiyonlar (örneğin `gammainc`) ve ileri düzey kodlama gerektirmektedir (StackExchange, 2020). Bu teknik zorluklar nedeniyle, çalışmamızda SPI hesaplamaları doğrudan standart normal dağılım varsayımıyla gerçekleştirilmiştir.

GEE üzerinde SPI hesaplamalarına yönelik literatürde farklı uygulamalar mevcuttur. UN-SPIDER tarafından hazırlanan kuraklık izleme kılavuzunda, CHIRPS verisi kullanılarak GEE üzerinde SPI hesaplamalarının nasıl yapılacağı adım adım açıklanmıştır; burada da dağılım olarak doğrudan standart normal varsayımına dayalı yöntemler kullanılmıştır (UN-SPIDER, 2022). Ayrıca, Kılıç vd., (2022) ve Thilagaraj vd., (2021) çalışmalarında GEE üzerinden SPI uygulamaları gerçekleştirilmiş; dağılım türü açıkça belirtilmemekle birlikte, pratikte doğrudan z-skor bazlı hesaplamalar tercih edilmiştir. Bu durum, GEE'nin parametrik esneklik eksikliği nedeniyle gamma dağılımının uygulanabilirliğinin sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Literatürde gamma dağılımı, sağa çarpık ve pozitif değerli yağış verilerinin modellenmesinde sıklıkla tercih edilmektedir (Thom, 1958; Tigkas vd., 2015; Şen, 2015). Ancak bazı bölgesel analizlerde, gamma dışı alternatiflerin daha iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Örneğin, Blain (2012) çalışmasında, Brezilya'nın São Paulo Eyaleti'nde yapılan analizlerde Pearson Tip III dağılımı ile hesaplanan SPI değerlerinin, gamma dağılımına kıyasla daha yüksek uyum sağladığı ve standart normal dağılım varsayımına daha yakın sonuçlar ürettiği rapor edilmiştir. Bu bulgu, yağış serilerinde gamma dağılımının her zaman en uygun dağılım olmadığını göstermesi açısından önemlidir.

Bu çalışmada kullanılan standart normal dağılım varsayımı, özellikle 12 ay ve üzeri uzun dönem SPI analizlerinde anlamlı ve kabul edilebilir sonuçlar üretmektedir. Bununla birlikte, kısa zaman ölçeklerinde (ör. SPI-1 ve SPI-3), uç kuraklık ve nemlilik değerlerinin yorumlanmasında dağılım tercihinin bağlı olarak sınırlı sapmalar olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Yapılan literatür taramasında çalışma havzası özelinde GEE platformu kullanılarak gerçekleştirilen SPI analizlerine dair daha önce yayımlanmış bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Bu yönüyle çalışma, bu alandaki ilk uygulamalardan biri olma niteliği taşımaktadır.

SPI hesaplamalarında, her zaman dilimi için indeks değeri, yağış miktarlarının uzun vadeli ortalama farkının standart sapmaya bölünmesiyle elde edilmiştir. SPI hesaplaması denklem 8'e göre yapılmıştır.

$$SPI = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad (8)$$

Denklem 8’de, X_i ilgili ayın toplam yağış miktarını, $\bar{X}$ uzun vadeli ortalama yağış miktarını ve σ ise yağışın standart sapmasını temsil etmektedir. Önceki çalışmalar, gamma dönüşümünün uygulanamadığı durumlarda da SPI hesaplamalarının uzun vadeli kuraklık analizleri açısından kullanılabilir olduğunu göstermektedir (Angelidis vd., 2012). Ancak, aşırı kurak ve aşırı nemli dönemlerde normal dağılım varsayımının hafif sapmalara neden olabileceği göz önünde bulundurulmalıdır.

2.2. Antalya Havzası’nın Mevcut Durumu ve Kuraklık Eylem Planının İncelenmesi (Current Status of the Antalya Basin and Examination of the Drought Action Plan)

Bu çalışmada, Türkiye’nin güneybatısında yer alan ve Antalya, Isparta, Burdur illerinin bir kısmını kapsayan Antalya Havzası incelenmiştir. Havzanın su kaynaklarının sürdürülebilirliği ve kuraklığa karşı kırılganlığını değerlendirmek amacıyla, T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü (SYGM) tarafından hazırlanan Antalya Havzası Kuraklık Eylem Planı temel alınmıştır. Bu eylem planı, havzanın mevcut su bütçesini ortaya koymak ve gelecekteki su potansiyelini iklim projeksiyonlarına dayalı modelleme çalışmalarıyla değerlendirmek amacıyla oluşturulmuştur.

Antalya Havzası, 20.091 km²’lik bir alanı kapsamakta olup, Türkiye’nin su kaynakları açısından önemli havzalarından biridir. Havzanın hidrolojik özelliklerini belirlemek amacıyla SYGM su bütçesi verileri ve havzadaki sanayi sektörünün su tüketim istatistikleri değerlendirilmiştir. Mevcut su potansiyelinin analizi için yerüstü ve yeraltı su kaynakları incelenmiş; sanayi, tarım, hayvancılık ve turizm gibi su kullanımına duyarlı sektörlerin yıllık tüketim değerleri dikkate alınmıştır.

Çalışmada, gelecekteki su potansiyeli değişimlerini belirlemek amacıyla, Antalya Havzası Kuraklık Eylem Planı’nda kullanılan hidrolojik modelleme sonuçları temel alınmıştır. Bu kapsamda, Hidrolojik İdare Su Denge Modeli (HBV) kullanılarak havzanın su bütçesi simüle edilmiştir. Modelleme sürecinde yağış, sıcaklık, buharlaşma ve kar erimesi gibi hidrolojik değişkenler analiz edilerek, RCP 4.5 ve RCP 8.5 iklim senaryolarına dayalı projeksiyonlar gerçekleştirilmiştir (Lindström vd., 1997). Günümüz su potansiyelini belirlemek için ise istatistiksel yağış-akış modelleri kullanılarak gözlemsel verilerle karşılaştırmalı analizler yapılmıştır.

Gelecek senaryolarını oluşturmak amacıyla HadGEM2-ES (Hadley Centre Global Environment Model, Version 2 - Earth System) modeli kullanılmıştır. RCP 4.5 (4.5 W/m² radyatif zorlama senaryosu) temel alınarak çalıştırılan bu model, havzanın gelecekteki su potansiyelinde meydana gelebilecek değişimleri öngörmek amacıyla tercih edilmiştir. HadGEM2-ES modeli, küresel iklim projeksiyonlarında sıkça kullanılan modellerden biri olup Birleşik Krallık Meteoroloji Ofisi Hadley Merkezi (UK Met Office Hadley Centre) tarafından geliştirilmiştir.

Bu çalışma kapsamında, SPI-12 analizleri gerçekleştirilerek elde edilen uzun vadeli kuraklık eğilimleri, Antalya Havzası Kuraklık Eylem Planı’nda öngörülen su azalım oranlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu doğrultuda, bölgedeki sanayi sektörleri için uygulanabilecek MET’ler belirlenmiştir. Böylece, kuraklık yönetim planlarında tahmin edilen azalma oranları ile SPI analizlerinden elde edilen bulgular birlikte değerlendirilerek bölgesel su yönetimi stratejilerine katkı sağlanmıştır.

2.3. Antalya Havzasında Su Tüketimi Açısından Riskli Olabilecek Sektörün ve Uygulanabilecek MET’lerin Belirlenmesi (Identification of the Sector Potentially at Risk in Terms of Water Consumption in the Antalya Basin)

Antalya Havzası’nda faaliyet gösteren sektörlerin su tüketim miktarları incelenmiş ve gelecekte olası kuraklık durumlarında faaliyetlerini sürdürebilmeleri için uygulamaları gereken teknikler belirlenmiştir. En fazla su tüketimi potansiyeline sahip sektörler odaklanılmış ve bu sektörlerden özellikle gıda sektörü ile sektörün su kaynaklarına olan etkileri detaylı şekilde analiz edilmiştir. Su kullanımını azaltmaya yönelik çeşitli öneriler geliştirilmiş, sektör bazlı su yönetimi stratejileri üzerine uygulamalı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, kuraklık dönemlerinde su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimini sağlamak adına kritik öneme sahiptir.

Çalışma alanında, su tüketimi en yüksek olan ve farklı Avrupa Topluluğu’ndaki Ekonomik Faaliyetlerin İstatistiksel Sınıflandırması (NACE) kodlarına göre üretim yapan tesisler tespit edilmiştir. Bu tesislerin su tüketim verileri ve üretim kapasiteleri, Tarım ve Orman Bakanlığı’ndan elde edilen bilgiler doğrultusunda değerlendirilmiş; gizlilik amacıyla tesisler Tesis 1, Tesis 2 ve Tesis 3 olarak adlandırılmıştır. Her bir tesisin farklı üretim süreçlerine ve faaliyet alanlarına sahip olması nedeniyle su tüketim miktarları ve ürün çeşitlilikleri de farklılık göstermektedir. Tesis bazlı su tüketim verileri üzerinden, havza genelinde su kullanımının sektörel bazda nasıl değişiklik gösterdiği de ortaya konmuştur. Yapılan hesaplamalarda, seçilen MET’ler doğrultusunda her bir tesis için potansiyel su tasarruf miktarı denklem 9’daki gibi hesaplanmıştır.

$$\text{Toplam su tasarrufu (L)} = \text{Birim ürün başına su tasarrufu (L/kg)} \times \text{Yıllık üretim miktarı (kg)} \quad (9)$$

Ayrıca, uygulanan MET'lerin toplam su tüketimi içerisindeki tasarruf oranını belirlemek amacıyla, su tasarruf oranı Denklem 10'da verildiği şekilde hesaplanmıştır.

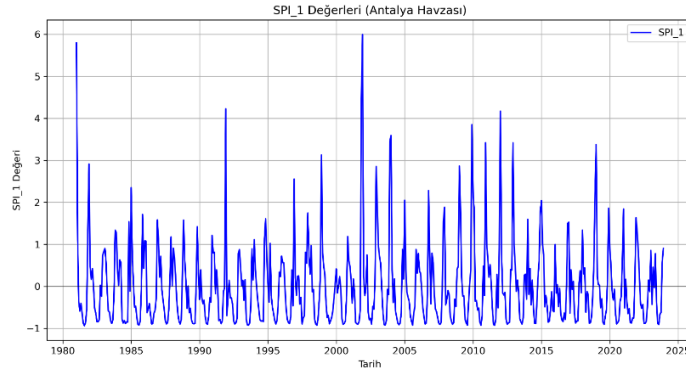
$$\text{Su tasarruf oranı (\%)} = \frac{\text{Toplam su tasarrufu}}{\text{Toplam su tüketimi}} \times 100 \quad (10)$$

Bu yaklaşımla, MET'lerin uygulanması durumunda her bir tesis için elde edilebilecek potansiyel tasarruf oranları belirlenmiş ve bu oranlar üzerinden en etkili su verimliliği yöntemleri tanımlanmıştır. Böylece çalışma, tesise özgü su verimliliği stratejilerinin geliştirilmesine doğrudan katkı sağlamaktadır.

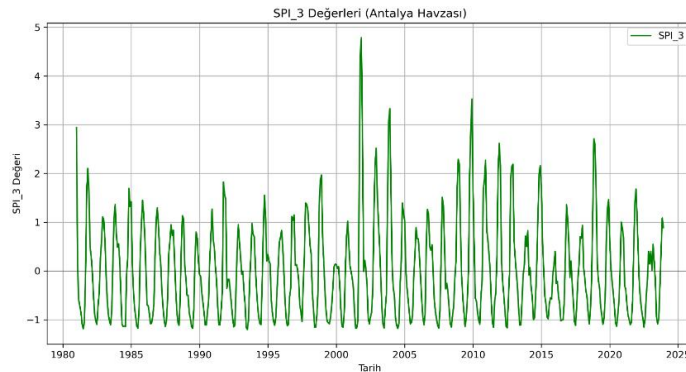
3. Araştırma Bulguları (Research Findings)

3.1. Antalya Havzası için SPI Kuraklık Analizi (SPI Drought Analysis for the Antalya Basin)

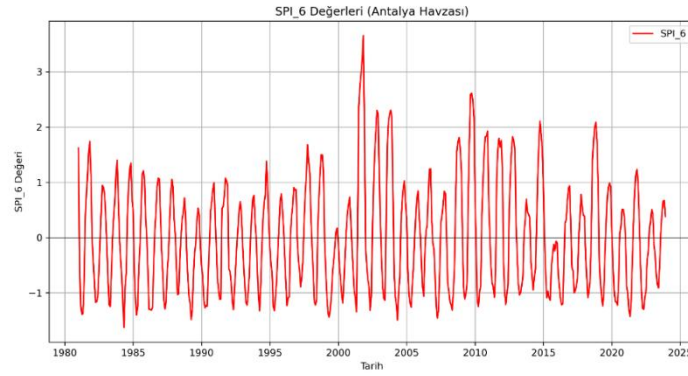
Antalya Havzası'nda Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI) hesaplamaları, Google Earth Engine (GEE) platformu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada yağış verileri olarak Kaliforniya Üniversitesi, Santa Barbara (UCSB) - İklim Tehlikesi Grubu (CHG) tarafından geliştirilen CHIRPS uydu veri seti kullanılmıştır. CHIRPS verileri, 0.05° (~5.3 km) mekânsal çözünürlüğe sahip olup, 1981 yılından itibaren küresel ölçekte yağış tahmini sağlamaktadır. SPI hesaplamalarında 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık zaman ölçekleri dikkate alınmış ve bu süreçte yalnızca aylık yağış verileri kullanılmıştır. Bu zaman serileri aşağıdaki Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. 0 değerinin altında kalan aylar, kurak dönemi temsil ederken, 0 değerinin üstünde kalan aylar, nemli olan dönemleri göstermektedir. Havzaya ait elde edilen SPI şekilleri aşağıda sunulmaktadır.



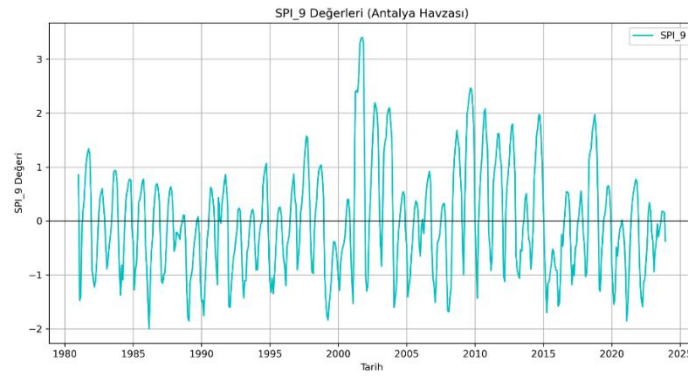
Şekil 2. Antalya havzası SPI-1 değerleri (SPI-1 values for the Antalya basin)



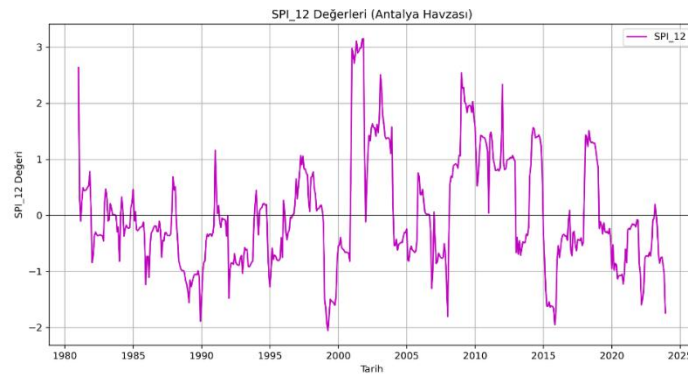
Şekil 3. Antalya havzası SPI-3 değerleri (SPI-3 values for the Antalya basin)



Şekil 4. Antalya havzası SPI-6 değerleri (SPI-6 values for the Antalya basin)



Şekil 5. Antalya havzası SPI-9 değerleri (SPI-9 values for the Antalya basin)



Şekil 6. Antalya havzası SPI-12 değerleri (SPI-12 values for the Antalya basin)

Tablo 2. SPI değerlerinin istatistiksel özeti (Statistical summary of SPI values)

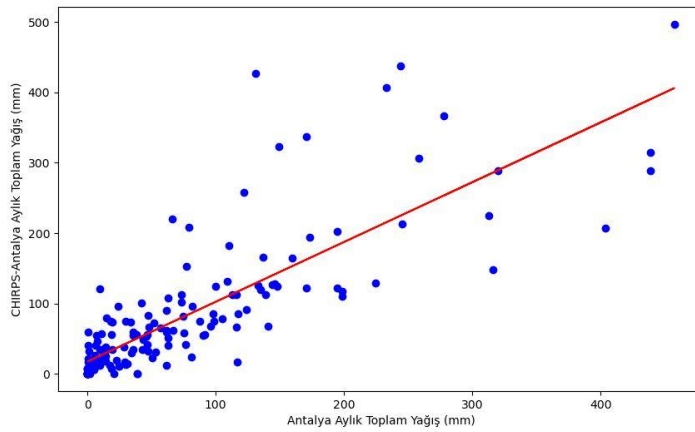
SPI Periyodu	Ortalama Yağış (mm)	Standart Sapma	Minimum SPI Değeri	Minimum SPI Tarihi	Maksimum SPI Değeri	Maksimum SPI Tarihi
SPI-1	65.72	66.08	-0.94	Temmuz 1983	5.99	Nisan 1987
SPI-3	195.79	148.03	-1.2	Aralık 1995	4.79	Kasım 1999
SPI-6	390.88	202.74	-1.63	Haziran 2000	3.66	Ağustos 2000
SPI-9	586.03	180.17	-2.0	Eylül 2010	3.4	Mayıs 2015
SPI-12	781.11	150.46	-2.06	Mart 2022	3.16	Şubat 2020

SPI hesaplamaları tamamlandıktan sonra tüm veriler, Virgülle Ayrılmış Değerler (CSV) formatında yıl, ay, yağış ve SPI değerleri şeklinde kaydedilmiş, ayrıca ortalama SPI haritası Coğrafi Etiketli Görüntü Dosya Formatı (GeoTIFF) olarak dışa aktarılmıştır. Elde edilen veriler, Python kullanılarak analiz edilmiş ve zaman serisi grafiklerine dönüştürülerek görselleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, 1 aylık SPI kısa vadeli yağış değişimlerini, 12 aylık SPI ise uzun vadeli eğilimleri yansıtmaktadır. SPI analiz sonuçlarının istatistiksel dağılımı Tablo 2’de sunulmuştur. Bu

tabloda, her bir SPI periyodu için ortalama yağış miktarı, standart sapma, en düşük ve en yüksek SPI değerleri ile bu değerlerin gözlemlendiği tarihler belirtilmektedir.

Tablo 2’de de görüldüğü üzere, kısa vadeli SPI periyotları (1-3 aylık) genellikle daha değişken olup, ani kuraklık ve nemlilik değişimlerini yansıtmaktadır. Uzun vadeli SPI periyotları (6-12 aylık) ise daha stabil olup, bölgenin genel kuraklık eğilimlerini belirlemede önemli bir gösterge olarak değerlendirilmiştir. Özellikle SPI-12 değeri -2.06 ile Mart 2022’de en düşük seviyeye ulaşmış, bu da bölgenin ciddi bir kuraklık dönemi geçirdiğini göstermektedir. Öte yandan, en yüksek SPI-1 değeri 5.99 ile Nisan 1987’de gözlenmiş, bu da aşırı nemli bir dönemi işaret etmektedir.

Antalya Havzası’nda CHIRPS veri setinin doğruluğunu belirlemek amacıyla, yerel meteoroloji istasyonu verileri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu doğrultuda, 1981-2023 yıllarına ait aylık yağış verileri kullanılarak korelasyon ve doğrulama analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, CHIRPS uydu verilerinin, yer istasyonu ölçümleriyle genel olarak yüksek uyum gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ancak, ekstrem yağış değerlerinde belirli sapmalar gözlemlenmiştir. CHIRPS ve Antalya meteoroloji istasyonu yağış verilerinin karşılaştırmasını gösteren korelasyon grafiği Şekil 7’de sunulmaktadır.



Şekil 7. CHIRPS ve Antalya meteoroloji istasyonu yağış verileri arasındaki korelasyon grafiği.
(Correlation graph between CHIRPS and Antalya meteorological station precipitation data)

Şekil 7’de, CHIRPS uydu verileri ile Antalya meteoroloji istasyonu yağış ölçümleri arasındaki ilişki sunulmaktadır. Yapılan analizler sonucunda, CHIRPS verilerinin genel olarak yer istasyonu ölçümleriyle uyumlu olduğu, ancak ekstrem yağış değerlerinde belirli sapmaların gözlemlendiği belirlenmiştir. Lineer regresyon eğrisi (kırmızı çizgi), CHIRPS’in düşük yağış miktarlarını hafif eksik, yüksek yağış miktarlarını ise hafif fazla tahmin etme eğiliminde olduğunu ortaya koymaktadır.

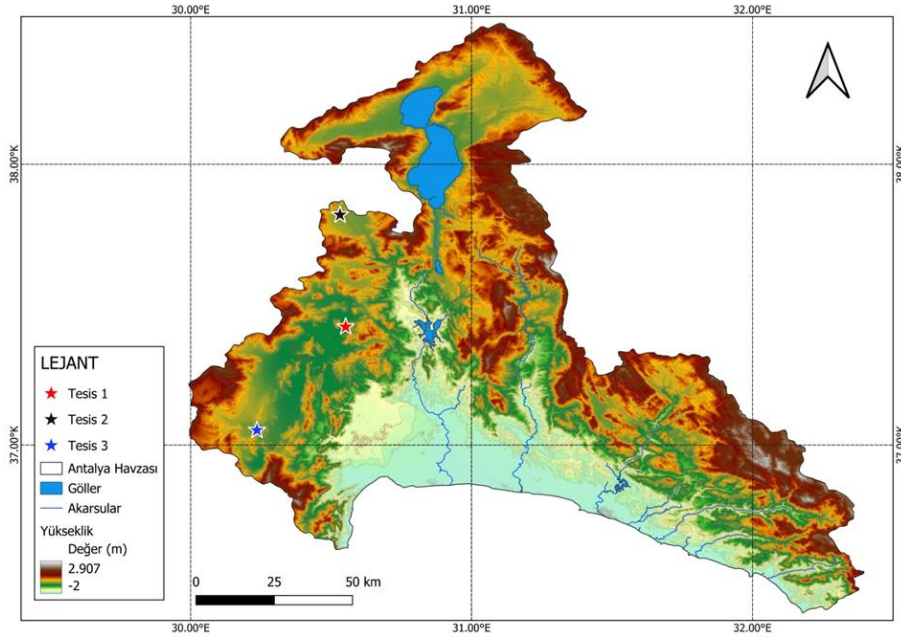
Yapılan korelasyon analizlerinde, Pearson korelasyon katsayısı 0.817, Spearman rho korelasyon katsayısı ise 0.874 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler, CHIRPS veri setinin Antalya Havzası’ndaki yağış ölçümleri ile yüksek derecede uyumlu olduğunu göstermektedir. Ayrıca, lineer regresyon modeli kullanılarak CHIRPS yağış tahminlerinin eğimi 0.851 ve kesme noktası 17.223 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, CHIRPS’in genel olarak güvenilir bir yağış kaynağı olduğunu ve yer istasyonu verileriyle güçlü bir ilişki gösterdiğini ortaya koymaktadır.

SPI analizleri, Antalya Havzası’nda kurak dönemlerin sıklıkla yaşandığını ve bu eğilimin uzun vadede su kaynakları yönetimi açısından önemli bir planlama gerektirdiğini göstermektedir. Yapılan analizler, 1, 3, 6, 9 ve 12 aylık SPI zaman serilerinin, bölgedeki kuraklık eğilimlerini belirlemede kritik bir gösterge olduğunu ortaya koymuştur. SPI değerlerinin sıfırın altına düştüğü dönemlerde kuraklık koşulları hakim olurken, sıfırın üzerindeki değerler nemli dönemleri temsil etmektedir.

Bu bulgular doğrultusunda, Antalya Havzası’nda kuraklık yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi ve bölgenin gelecekteki su taleplerine karşı dayanıklılığının artırılması gerektiği vurgulanmaktadır. Özellikle endüstri ve tarım sektörü ve su yönetimi politikalarının, artan kuraklık riskini göz önünde bulundurularak yeniden şekillendirilmesi gerekmektedir. Elde edilen SPI sonuçları, ilerleyen yıllarda kuraklık olaylarının artabileceğine dair önemli sinyaller vermekte olup, su kaynakları üzerindeki baskının artacağı ve tarımsal üretimde kayıplara yol açabileceği öngörülmektedir.

3.2. Antalya Havzasında Su Tüketimi Açısından Belirlenen Riskli Olabilecek Sektörler (Sectors Identified as Potentially Risky in Terms of Water Consumption in the Antalya Basin)

Antalya Havzası'nda yer alan sanayi tesisleri, su tüketimi açısından önemli bir paya sahiptir. SYGM tarafından yayımlanan su tüketim istatistiklerine göre, havzada sanayi sektörünün yıllık toplam su tüketimi 56.54 hm³ olarak belirlenmiştir. Havzanın mevcut ve gelecekteki su potansiyeli karşılaştırılarak, RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryolarına dayalı hidrolojik modelleme sonuçlarına göre, bölgedeki su kaynaklarında %30-32 oranında bir azalma öngörülmektedir. (SYGM, 2018). Antalya havzasında su tüketim bakımından havzadaki diğer tesislere kıyasla yüksek seviyede olan pilot üç farklı tesis seçilmiş ve sunulmuştur (Şekil 8). Süthane işletmeciliği ve peynir imalatı (NACE 10.51) Tesis 1, alkolsüz içeceklerin imalatı; maden sularının ve diğer şişelenmiş suların üretimi (NACE 11.07) Tesis 2 ve başka yerde sınıflandırılmamış meyve ve sebzelerin işlenmesi ve saklanması (NACE 10.39) Tesis 3 olarak belirlenmiştir. Tesis 3'te, bu iki tesisten farklı olarak, katı ürün üretimi de yapılmaktadır. Hesaplamalarda, katı ürünün yoğunluğu belirlenerek, eşdeğer sıvı yoğunluğu olarak kabul edilmiş ve toplam sıvı madde üretimi cinsinden baz alınmıştır. İklim değişikliğinin beraberinde getirdiği; yağış rejimindeki değişiklikler, sıcaklık artışları ve buharlaşma oranları dikkate alınarak, havzanın su kaynaklarındaki potansiyel azalmanın su kaynakları üzerindeki olası etkileri analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında su kaynaklarındaki bu beklenen düşüşün, özellikle bölgedeki endüstriyel üretim üzerindeki olumsuz etkilerini en aza indirmek amacıyla, endüstrilere yönelik uygulanabilecek MET'ler önerilmiştir. Bu teknikler, suyun daha verimli kullanımı ve su yönetiminde sürdürülebilir uygulamaların hayata geçirilmesine yönelik stratejiler içermektedir.



Şekil 8. Antalya havza alanı ve pilot tesisler (Antalya basin area and pilot facilities)

3.3. Tesislere Uygulanabilecek MET'lerin Belirlenmesi ve Potansiyel Tasarruf Oranlarının Hesaplanması (Identification of BATs Applicable to Facilities and Calculation of Potential Savings Rates)

Kuraklık verilerine dayanarak, Antalya Havzası'nda faaliyet gösteren üç farklı tesisin su tüketimi ayrıntılı bir şekilde analiz edilmiştir. Tesislerin su tüketimleri dikkate alınarak, her bir tesise SYGM raporlarında sunulan öncelikli olarak uygulanabilecek MET'lerin sağlayabileceği olası su potansiyel tasarrufları hesaplanmış ve bu tasarrufların, kuraklığa uyum durumları değerlendirilmiştir. Ayrıca, MET'lerin uygulanması durumunda tesislerin su tüketimindeki olası azalma oranlarının, kuraklık kaynaklı su azalmasını karşılayıp karşılamadığı araştırılmıştır. MET'lerin belirlenmesi aşamasında, ilgili sektörün ve diğer sektörlerin referans dokümanları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Tesis 1'de, su kullanımını ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla çeşitli MET'lerin uygulanması varsayılmıştır. Bu kapsamda, atıksu miktarını ve kirlenme yükünü azaltmak için entegre bir atıksu yönetimi ve arıtma stratejisi (MET 1), evaporatör ünitelerinden gelen buharın, kondensat cilalama/parlatıcı ve ters osmoz sistemleriyle filtrelmesi ve kondensatın geri kazanılması (MET 2) ve su yumuşatma sistemlerinde rejenerasyon sıklığının ve süresinin optimize edilmesi (MET 3) tekniklerinin uygulanması varsayılmıştır.

Tesis 2'de, su kullanımını ve atık miktarını azaltmak amacıyla çeşitli MET'lerin uygulanması varsayılmıştır. Bu

kapsamda, nanofiltrasyon (NF) veya ters osmoz (TO) konsantrilerinin karakterizasyonuna bağlı olarak arıtılmadan veya arıtıldıktan sonra geri kullanılması (MET 4), su kullanımının azaltılması amacıyla kapalı döngü soğutma sisteminin kullanılması (MET 5) ve kapalı döngüye sahip olmayan sistemlerde kule soğutma uygulaması ile suyun geri kazanımı (MET 6) tekniklerinin uygulanması öngörülmüştür. Bu yaklaşımlar sayesinde tesisin su verimliliğinin artırılması ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlanması hedeflenmiştir.

Tesis 3'te, su kullanımını ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla çeşitli MET'lerin uygulanması varsayılmıştır. Bu kapsamda, uygun proseslerde kapalı döngü su çevrimlerinin kullanılması (örneğin; soğutma prosesleri ve ıslak tutucular gibi alanlarda) (MET 7), gri suların ayrı toplanıp arıtılmasıyla yeşil alan sulama, yer ve zemin yıkama gibi yüksek su kalitesi gerektirmeyen alanlarda kullanılması (MET 8) ve ileri arıtma uygulanan suların içme suyu standartlarını gerektiren proseslerde değerlendirilmesi (MET 9) öngörülmüştür. Bu uygulamalar sayesinde tesisin su verimliliğinin artırılması ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlanması amaçlanmıştır.

Tekniklerin seçimi sırasında, geri ödeme süresi kısa olanlar ve potansiyel su tasarrufu oranlarının ortalaması ve öncelikli olarak uygulanabilecek olanlar dikkate alınmış olup Tablo 3'te sunulmuştur. Belirlenen MET'ler aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Tablo 3. Mevcut en iyi tekniklerin uygulanması durumunda elde edilebilecek potansiyel su tasarruf miktarları ve geri ödeme süreleri (Potential water savings and payback periods from the implementation of best available techniques)

Tesis	Tesislere Uygulanabilecek Mevcut En İyi Teknikler	Ortalama Geri Ödeme Süresi (Yıl)	Potansiyel Ortalama Su Tasarruf Miktarı (L/kg veya litre)
Tesis 1	MET 1	2.5	0.0511
	MET 2	<1	1.6658
	MET 3	4.1	0.0633
Tesis 2	MET 4	<1	0.0257
	MET 5	<1	0.0063
	MET 6	2.9	0.0082
Tesis 3	MET 7	2.4	0.3153
	MET 8	4.4	0.2538
	MET 9	1.5	0.5267

MET 1: Atıksu miktarını ve kirletici yükünü azaltmak için entegre atıksu yönetimi ve arıtma stratejisi kullanılması

Atıksu yönetimi, atıksuyun üretiminden bertarafına kadar kompozisyon, toplama, arıtma ve yeniden kullanım gibi süreçleri kapsayan bütüncül bir yaklaşımı gerektirmektedir. Endüstriyel atıksuların arıtılması, arazi mevcudiyeti, su kalitesi ve yasal düzenlemeler gibi faktörlere dayanarak seçilen uygun teknolojilerle gerçekleştirilir (Abbassi ve Al Baz, 2008). Arıtılmış suyun yeniden kullanımı hem su kalitesini artırmakta hem de tatlı su talebini azaltmaktadır. Entegre atıksu yönetiminde, toplama sistemi, arıtma ve yeniden kullanım hedefleri birlikte değerlendirilmektedir (Naghedi vd., 2020). MET 1, bağlı bulunduğu sektörün atıksu kirliliğinde %25'e varan azalma sağlarken, endüstrinin mevcut durumuna göre geri ödeme süresi 1-10 yıl arasında değişmektedir. (TOB, 2021).

MET 2: Evaporatör ünitelerinden gelen buharın, kondensat cilalama/parlatıcı ve ters osmoz sistemleriyle filtrelmesi ve kondensatın geri kazanılması

Endüstriyel tesislerde buhar tesislerinden gelen yoğunlaşmanın geri kazanımı, sürdürülebilir su yönetimi ve maliyet tasarrufu sağlamak amacıyla önemli bir adımdır. Bu süreçte, yoğunlaşan su, kondensat parlatıcılar ve TO sistemleri aracılığıyla filtrelenir ve arındırılarak yeniden kullanıma uygun hale getirilmektedir. Kondensat parlatıcılar, yoğunlaşmış suyu safsızlıklardan temizlerken, TO sistemi suyu daha da arındırarak mineral içeriğinden arındırılmış yüksek saflıkta su elde edilmesini sağlamaktadır. Bu sayede, geri kazanılan su buhar üretimi, soğutma veya diğer endüstriyel işlemler için tekrar kullanılabilir; böylece %50'ye varan oranlarda su tasarrufu sağlanabilir. Yoğunlaşmış suyun tekrar kullanımı, hem su maliyetlerini azaltarak işletme verimliliğini artırmakta hem de doğal su kaynaklarının korunmasına katkıda bulunmaktadır (Santonja vd., 2019).

MET 3: Su yumuşatma sistemlerinde rejenerasyon sıklığının ve süresinin optimize edilmesi

Endüstriyel su yumuşatma sistemlerinde rejenerasyon sıklığının optimize edilmesi, hem su ve enerji tasarrufu sağlamak hem de işletme maliyetlerini düşürmek açısından kritik öneme sahip olmaktadır. Katyonik iyon değiştirici reçinelerle yapılan bu işlemde, rejenerasyon sıklığı genellikle su sertliğine göre ayarlanır; su sertliği yüksekse rejenerasyon daha sık yapılmaktadır. Ancak, gereğinden fazla rejenerasyon su ve kimyasal israfına yol açabilir. Bu süreci optimize etmek için kullanılan online sertlik sensörleri, su sertliğini sürekli izleyerek yalnızca ihtiyaç duyulduğunda rejenerasyon yapılmasını sağlar ve gereksiz yıkama, durulama gibi işlemleri önlemektedir. Böylece, su ve kimyasal tüketimi azaltılırken, rejenerasyon işlemi sonrasında çıkan yıkama ve durulama suları ham su kalitesine uygunsa geri kazanılarak, ham su deposuna yönlendirilir veya su kalitesi gereksinimi düşük proseslerde kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, su kaynaklarının korunmasına katkıda bulunurken işletmenin çevresel etkisini azaltmakta ve verimliliği artırmaktadır (TOB, 2021).

MET 4: Nanofiltrasyon (NF) veya ters osmoz (TO) konsantrelerinin karakterizasyonuna bağlı bir şekilde, arıtılarak veya arıtılmadan tekrar kullanılması

Membran proseslerinden kaynaklanan atıksuların karakterizasyonu ve uygun kullanım noktalarına göre yeniden kullanım potansiyelleri değerlendirildiğinde, kimyasal kullanılmadan veya kimyasal kullanılarak gerçekleştirilen geri yıkama, CIP (yerinde temizleme) temizlik işlemleri, modül temizliği ve kimyasal tankların temizliği gibi süreçlerde su geri kazanımı mümkündür. Nanofiltrasyon, düşük enerji tüketimi ve düşük işletme basıncıyla kuyu suyu ve yüzey suyu arıtımında kullanılan etkili bir membran bazlı sıvı ayırma tekniğidir. TO ise NF'den daha küçük boyuttaki maddeleri ayırabilen bir tekniktir. NF veya TO konsantrelerinin karakterizasyonuna bağlı olarak bu suların arıtılarak veya arıtılmadan yeniden kullanımı su tasarrufu sağlayabilir. Filtreleme işlemleri sonucunda ortaya çıkan geri yıkama suları üretim süreçlerinde yeniden kullanılmalı ve temizlik sistemleri ile su tüketimini azaltacak önlemler alınmalıdır (Akgül, 2016; TOB, 2021).

MET 5: Su kullanımının azaltılması amacıyla kapalı döngü soğutma sisteminin kullanılması

Kapalı döngü soğutma sistemleri, açık döngü sistemlere kıyasla su tüketimini önemli ölçüde azaltan verimli bir seçenektir. Bu sistemlerde, soğutma işlemi için kullanılan su aynı döngüde tekrar dolaştırılır; yalnızca buharlaşma kayıplarını karşılamak için bir miktar yeni su eklenmesi gerekmektedir. Sistem içerisindeki döngü sayısı artırılarak ve suyun kalitesi iyileştirilerek, su tüketimi daha da azaltılabilir. Soğutma sistemlerinde istenmeyen mikrobiyal büyüme gibi durumlar kimyasal şartlandırma ile kontrol edilerek döngü sayısı artırılabilir ve böylece sisteme giren taze su miktarı azaltılır. Bu yöntemle, üretim süreçlerinde su tüketimi optimize edilerek hem maliyetler düşürülmekte hem de çevresel sürdürülebilirlik sağlanmaktadır (TOB, 2021).

MET 6: Kapalı döngüye sahip olmayan sistemlerde kule soğutma uygulaması ile su geri kazanımı

Soğutma kuleleri, çalışma prensiplerine göre karşı akışlı ve çapraz akışlı olarak ikiye ayrılır. Karşı akışlı kulelerde su aşağı doğru akarken hava yukarı doğru, çapraz akışlı kulelerde ise su aşağı doğru akarken hava yatay olarak hareket etmektedir. Bu sistemlerde su, soğutma işlemi sırasında soğuk su havuzuna inene kadar havayla temas ederek soğur ve ardından tesise geri gönderilmektedir. Ancak, bu süreçte suyun bir kısmı buharlaşır ve buharlaşma sonucunda nemi artan hava, kule üstündeki fan bacasından atmosfere atılmaktadır. Buharlaşma kayıpları iyi yönetilmezse hem su tüketimi artmakta hem de maliyetler yükselmektedir. Soğutma kulelerinde, bakteri ve parazit oluşumunu engellemek ve kireç birikimlerini kontrol etmek amacıyla çeşitli kimyasallar kullanılmaktadır. Ancak bu kimyasallar buharlaşma sırasında yoğunlaşarak tortu ve istenmeyen birikintilere yol açabilmektedir. Bu durumu kontrol etmek için blöf sistemi uygulanmaktadır. Blöf suları, membran filtrasyon sistemleri veya iyon değiştirici reçinelerle arıtılarak tekrar kullanılabilir hale getirilebilir, böylece hem su tasarrufu sağlanmakta hem de kimyasal birikimler minimize edilmektedir (TOB, 2021).

MET 7: Uygun proseslerde kapalı döngü su çevrimlerinin kullanılması

Soğutucu akışkanlar, soğutulacak maddelerden ısı alarak soğutma işlemini gerçekleştiren ve termodinamik özellikleri ile performansı etkileyen kimyasal bileşiklerdir (Kuprasertwong vd., 2021). İmalat sanayinde su, yaygın bir soğutucu akışkan olarak kullanılmakta ve soğutma işlemi sırasında soğutma kuleleri veya merkezi sistemlerle geri kazanılabilmektedir. Mikrobiyal büyüme durumunda, resirkülasyon suyuna kimyasal eklenerek kontrol sağlanabilir (TÜBİTAK MAM, 2016). Soğutma suyunun yeniden kullanılması, su tüketimini ve atıksu miktarını azaltır, ancak soğutma ve resirkülasyon için enerji gereksinimi ortaya çıkmaktadır. Isı değiştiriciler ile ısı geri kazanımı da mümkün olmaktadır. Kapalı döngü sistemlerin kullanıldığı tesislerde, soğutma sistemi blöfleri arıtma tesisine gönderilmekte ve uygun üretim süreçlerinde yeniden kullanılabilir (TOB, 2021).

MET 8: Tesiste gri suların ayrı toplanıp arıtılması ve yüksek su kalitesi gerektirmeyen alanlarda kullanılması

Endüstriyel tesislerde sadece üretim süreçlerinden değil, personel duşları, lavabolar ve mutfak gibi sosyal alanlardan da atıksular oluşmaktadır. Bu tür alanlardan kaynaklanan sular, genellikle kirleticiler açısından daha düşük yüklere sahip oldukları için "gri su" olarak adlandırılmaktadır. Gri sular, üretim atıklarına göre daha az kirletici içerdiğinden, ayrı olarak toplanıp daha basit arıtma yöntemleriyle işlenebilir. Bu işlenen sular, yüksek kaliteli su gerektirmeyen alanlarda, örneğin tesisin yeşil alanlarının sulanması, yer ve zeminlerin yıkanması gibi amaçlarla kullanılabilir. Böylece, tesisin toplam taze su tüketimi önemli ölçüde azalmakta, maliyetler düşürülmekte ve doğal su kaynakları üzerindeki baskı hafifletilmiş olmaktadır. Gri suların bu şekilde yeniden kullanılması, hem ekonomik bir çözüm sunmakta hem de sürdürülebilir su yönetimi uygulamalarını desteklemektedir (TÜBİTAK MAM, 2016).

MET 9: İleri arıtma uygulanan suların içme suyu standartları gerektiren proseslerde değerlendirilmesi

İleri arıtma süreçlerinden geçirilmiş atıksular, içme suyu kalitesine yakın saflıkta olduğundan, özellikle gıda endüstrisinde hijyen gerektiren işlemler için ideal bir çözüm sunmaktadır. Biyolojik arıtmadan geçen atıksular, TO sistemi ile çözünmüş tuzlar ve diğer safsızlıklardan arındırılır ve ardından Ultraviyole (UV) dezenfeksiyonu ile mikroorganizmalar yok edilerek hijyenik hale getirilmektedir. Bu şekilde arıtılmış su, pişirme, ürün içeriği hazırlama ve üretim hattında temizlik gibi içilebilir su kalitesi gerektiren süreçlerde güvenle kullanılabilir. Taze su kullanımının azaltılmasıyla hem maliyetler düşerken hem de doğal su kaynakları korunur, bu da su kıtlığının yaşandığı veya maliyetlerin yüksek olduğu bölgelerde sürdürülebilir su yönetimi için önemli bir katkı sağlamaktadır (TÜBİTAK MAM, 2016).

MET'lerin uygulanması, su kaynakları üzerindeki baskıyı azaltarak, özellikle kuraklık dönemlerinde sektörel sürdürülebilirlik artırılabilir. Tesislerin yıllık su tüketim ve üretim miktarları Tablo 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4. Tesislerin yıllık su tüketim ve üretim miktarları
(Annual water consumption and production quantities of the facilities)

Tesis	Yıllık Su Tüketimi (Litre)	Üretim Miktarı (Kg veya litre)
Tesis 1	10.800.000	3.816.739 kg
Tesis 2	209.372.000	99.969.769 litre
Tesis 3	322.487.000	44.027.080 kg katı ürün, 51.840.000 litre sıvı ürün

Üç farklı tesiste her birine 3 farklı MET uygulanacağı varsayılarak, bu uygulamaların su tüketimi üzerindeki olası azalma miktarları ve tasarruf oranları belirlenmiştir. Buna göre, Tesis 1'de varsayılan MET 1, MET 2 ve MET 3'ün ortalama geri ödeme süreleri 2.5 yıl olarak hesaplanmıştır (SYGM 2023). Yapılan hesaplamalara göre, bu üç MET'in uygulanması durumunda birim ürün başına ortalama 0.5934 litre su tasarrufu sağlanabilecektir. Tesis 1'de, birim ürün başına su tüketimi yaklaşık 2829.64 litre/kg olarak hesaplanmıştır. Tekniklerin uygulanması durumunda yaklaşık ortalama potansiyel su tasarruf oranı %20.97 olarak hesaplanmıştır.

Tesis 2'de, su tasarrufunu artırmak amacıyla çeşitli tekniklerin uygulanabileceği varsayılmıştır. Uygulanabilecek üç farklı teknikten ikisinin geri ödeme süresi 1 yılın altında olup, bir teknik için geri ödeme süresi 2.9 yıl olarak belirlenmiştir (SYGM, 2023). Bu tekniklerin uygulanmasıyla, birim ürün başına 0.0402 litre su tasarrufu sağlanabilmektedir. Tesisin ortalama potansiyel su tasarruf oranı yaklaşık %0.64 olarak hesaplanmıştır. NACE 11.07 sektöründe, suyun büyük kısmı doğrudan hammadde olarak kullanıldığından, atık su miktarının düşük olması nedeniyle su tasarrufu oranı diğer sektörler için daha düşük çıkmıştır. Bu bağlamda her bir sektörün kendi üretim dinamikleri olması nedeniyle, her bir MET bütün sektörlerde aynı tasarruf oranlarını veremeyebilir. Bu yüzden uygulanması planlanan MET'lerin endüstrinin üretim proseslerine göre şekillendirilmesi önem arz etmektedir. Hesaplanan olası potansiyel tasarruf oranları yalnızca NACE 11.07 sektörü özelinde geçerli olup, farklı sektörlerde farklı tasarruf oranları elde edilebilmektedir.

Son olarak Tesis 3'te, su tasarrufunu artırmak amacıyla MET 7, MET 8 ve MET 9'un uygulandığı varsayılmıştır. Bu tekniklerin ortalama geri ödeme süresi 2.8 yıl olarak hesaplanmıştır (SYGM, 2023). Tesiste MET'lerin uygulanması durumunda, birim ürün başına ortalama 0.3653 litre su tasarrufu sağlanabileceği belirlenmiştir (SYGM, 2023). Bu tekniklerin uygulanması ile birlikte ortalama potansiyel su tasarruf oranı yaklaşık %10.86 olarak hesaplanmıştır.

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışma, Antalya Havzası'nda endüstriyel su tüketimi ve su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi üzerine önemli bilgiler sunmaktadır. 1981–2023 yılları arasındaki yağış verileri kullanılarak gerçekleştirilen Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI) analizleri, bölgede nemli dönemlere göre daha sık kuraklık yaşandığını ortaya koymuştur. Özellikle kısa ve uzun vadeli SPI periyotları, Antalya Havzası'nda meydana gelen kuraklık olaylarının bölgedeki su kaynakları üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir. Bu durum, havzanın kurak dönemlere eğilimli olduğunu ve su kaynakları yönetimi için daha güçlü stratejilerin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, farklı zaman ölçekleri kullanılarak kuraklık ve nemlilik şiddetinin ve süresinin SPI yöntemiyle belirlenebileceğini ortaya koymakta; bu sayede, su kaynaklarının durumu, toprak nemi, nehirler, yeraltı su seviyeleri ve hidrolojik planlamalar açısından kapsamlı değerlendirmeler yapılmasına olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada kullanılan CHIRPS veri seti, literatürde uzun vadeli analizler ve küçük ölçekli havza çalışmalarında başarılı bir şekilde kullanılan uydu tabanlı bir yağış ürünü olarak kabul edilmektedir. Hisam vd., (2023) tarafından yapılan çalışmada, Akdeniz bölgesinde CHIRPS'in küçük ölçekli havzalar için güvenilir bir yağış kaynağı olduğu ve uzun vadeli analizlerde başarılı sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Bu doğrultuda, çalışmada kullanılan veri setinin Antalya Havzası'ndaki kuraklık eğilimlerinin belirlenmesi açısından uygun bir seçim olduğu değerlendirilmektedir.

Bölgedeki NACE 10.51, NACE 11.07 ve NACE 10.39 sektörlerinde su tüketiminin yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu sektörlerde su verimliliğini artırmak için MET uygulamalarının kullanılması önerilmektedir. Yapılan analizler, farklı MET stratejilerinin su tüketimini önemli ölçüde azaltabileceğini ve geri ödeme sürelerinin genellikle kısa olduğunu göstermektedir. Antalya Havzası'nda su tüketimini azaltmada en etkili MET uygulamalarının, özellikle atıksu yönetimi ve su geri kazanımı üzerine odaklandığı görülmüştür. Kapalı döngü soğutma sistemleri, su yumuşatma sistemleri ve evaporatör tesislerinden gelen buhardan su geri kazanımı gibi teknikler, tesislerin su tüketimini önemli ölçüde azaltabilir. Su kullanımının verimli hale getirilmesi ve atıksuların yeniden kullanılması, bölgedeki su kaynaklarına olan baskıyı azaltabilir. Tesis 1, Tesis 2 ve Tesis 3 için ortalama potansiyel su tasarruf oranları yaklaşık olarak %20.97, %0.64 ve %10.86 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bu üç tesiste toplamda 9 farklı MET'in uygulanması durumunda, ortalama potansiyel su tasarruf oranı yaklaşık %10.82 olarak belirlenmiştir.

Bu sonuçlar, Antalya Havzası'nın gelecekteki kuraklık dönemlerine uyum sağlamak için su yönetimi stratejilerini daha verimli hale getirmesi gerektiğini göstermektedir. Çalışmada elde edilen SPI-12 zaman ölçeğindeki eğilimler, bölgenin uzun vadeli su yönetimi politikalarının yeniden gözden geçirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Benzer şekilde, Mahnamfar ve Nigussie (2023) tarafından yapılan çalışmada da SPI-12 zaman ölçeğinde anlamlı eğilimlerin gözlemlendiği ve uzun vadeli su yönetimi açısından bu ölçeğin dikkate alınması gerektiği belirtilmiştir. Bu doğrultuda, Antalya Havzası'nda kuraklık yönetimi stratejilerinin güçlendirilmesi ve SPI-12 zaman ölçeği dikkate alınarak ileriye dönük senaryoların geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Endüstriyel sektörlerde su tüketiminin optimize edilmesi, hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır. MET'lerin uygulanmasıyla su tüketiminin azaltılması ve su kaynaklarının korunması mümkün hale gelmekte, bu da bölgede su yönetiminin daha etkili olmasını sağlamaktadır. Bu nedenle, bu çalışma, kuraklık ve su kaynakları yönetiminin, özellikle tarım ve endüstriyel üretim gibi suya bağımlı sektörlerde daha iyi bir şekilde entegre edilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Ek olarak, iklim değişikliğinin etkilerinin daha da belirginleşeceği göz önünde bulundurularak, bölgenin su taleplerine karşı dayanıklılığının artırılması ve sürdürülebilir su yönetimi politikalarının hızla uygulanması gerekmektedir.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Abbassi, B ve Al Baz, İ. 2008. Integrated Wastewater Management: A Review. Efficient Management of Wastewater, 29-40
- Abramowitz, M. ve Stegun, A., 1965. Handbook of Mathematical Functions, Dover, New York.
- Akgül, D. 2016. Türkiye'de Ters Osmoz Ve Nanofiltrasyon Sistemleri ile İçme ve Kullanma Suyu Üretiminin Maliyet Analizi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Aktürk, G., Zeybekoğlu, U., Yıldız, O. 2022. SPI ve SPEI Yöntemleri ile Kuraklık Araştırması: Kırıkkale örneği. Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi, 14(2), 762-776.

- Angelidis, P., Maris, F., Kotsovinos, N., Hrissanthou, V. 2012. Computation of Drought Index SPI with Alternative Distribution Functions. *Water Resources Management*, 26(9), 2453-2473. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0026-0>
- Awchi, T.A. ve Kalyana, M.M. 2017. Meteorological Drought Analysis In Northern Iraq Using SPI And GIS. *Sustainable Water Resources Management*, 3(4), 451-463.
- Bacanli, U.G. ve Kargi, P.G. 2019. Drought Analysis in Long and Short Term Periods: Bursa case. *Journal of Natural Hazards and Environment*, 5(1), 166-174.
- Bates, B., Kundzewicz, W.Z., Wu, S., Palutikof, J. 2008. *Climate Change and Water*. IPCC Technical Paper VI, 214p.
- Benny, B., Vinod, D., Mahesha, A. 2024. Fortnightly Standardized Precipitation Index Trend Analysis for Drought Characterization in India. *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 4891-4908. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04905-x>
- Blain, G.C. 2012. Monthly values of the standardized precipitation index in the State of São Paulo, Brazil: trends and spectral features under the normality assumption. *Agrometeorology, Bragantia* 71(1). <https://doi.org/10.1590/S0006-87052012005000004>
- Edwards, D. C. ve McKee, T. B. 1997. Characteristics of 20th Century Drought in the United States at Multiple Time Scales. *Climatology Report Number 97-2*, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Flörke, M., Schneider, C., McDonald, R.I. 2018. Water Competition Between Cities and Agriculture Driven by Climate Change and Urban Growth. *Nature Sustainability*, 1(1), 51-58.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoel, A., Michaelsen, J. 2015. The Climate Hazards Infrared Precipitation with Stations: A New Environmental Record for Monitoring Extremes. *Scientific Data*, 2, 150066.
- Guttman, N. B. 1998. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Resources Association*. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05964.x>
- Guttman, N. B. 1999. Accepting the Standardized Precipitation Index: A Calculation Algorithm. *Journal of the American Resources Association*. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>
- Hisam, E., Mehr, A. D., Alganci, U., Seker, D. Z. 2023. Comprehensive Evaluation of Satellite-Based and Reanalysis Precipitation Products Over The Mediterranean Region in Turkey. *Advances in Space Research*, 71(7), 3005-3021. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.03.004>
- IPCC. 2013. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change, New York, NY, USA, 1535 pp
- Karapinar, B. 2023. As the Climate Bakes, Turkey Faces a Future Without Water. *Yale Environment* 360. Retrieved from <https://e360.yale.edu/features/as-the-climate-bakes-turkey-faces-a-future-without-water>
- Kassaye, A.Y., Shao, G., Wang, X., Wu, S. 2021. Quantification of Drought Severity Change in Ethiopia During 1952-2017. *Environmental Development and Sustainability*, 23(4), 5096-5121.
- Kılıç, M., Gunal, H., Gundgan, R. 2022. Drought Monitoring on Google Earth Engine with Remote Sensing: A Case Study of Şanlıurfa. *Levantine Journal of Applied Sciences*, 2(2), 35-40. <http://dx.doi.org/10.56917/ljoas.13>
- Kummu, M., Guillaume, J.H., de Moel, H., Eisner, S., Flörke, M., Porkka, M., Siebert, S., Veldkamp, T.I.E., Ward, P.J., 2016. The World's Road to Water Scarcity: Shortage and Stress in the 20th Century and Pathways Towards Sustainability. *Scientific Reports*, 6(1), 1-16.
- Kuprasertwong, N., Padungwatanaroj, O., Robin, A., Udomwong, K., Tula, A., Zhu, L., Zhou, L., Wang, B., Wang, S., Gani, R. 2021. Computer-Aided Refrigerant Design: New Developments. *Computer-Aided Chemical Engineering*, 50, 19-24.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M., Bergström, S. 1997. Development And Test of the Distributed HBV-96 Hydrological Model. *Journal of Hydrology*, 201(1-4), 272-288.
- Lloyd-Hughes B. ve Saunders, M.A. 2002. A drought climatology for Europe
- Mahnamfar, F. ve Nigussie, T. A. 2023. Assessment Of Drought Characteristics and Trend Analysis in Antalya Basin, Turkey. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, Scienceline Publication.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J. 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*.
- Mekonnen, M.M. ve Hoekstra, A.Y. 2016. Four Billion People Facing Severe Water Scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323.
- Naghedi R., Moghaddam, M.R.A., Piadeh, F. 2020. Creating functional group alternatives in integrated industrial wastewater recycling system: A case study of Toos Industrial Park (Iran). *Journal of Cleaner Production*, 257, 120464. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120464>
- Pinarlik, M. 2023. The Effects of Climate Change on Water Resources in Turkey. *Proceedings of the 2022 International Symposium on Energy Management and Sustainability*. Springer.
- Salvacion, A.R. 2021. Mapping Meteorological Drought Hazard in The Philippines Using SPI and SPEI. *Spatial Information Research*, 29(6), 949-960.
- Santonja, G.G., Karlis, P., Stubdrup, K.R., Brinkmann, T., Roudier, S. 2019. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Food, Drink and Milk Industries; EUR 29978 EN.
- Sırdaş, S. 2002. Meteorolojik Kuraklık Modellemesi ve Türkiye Uygulaması. Doktora Tezi-127212, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- SYGM. 2018. Antalya Havzası Kuraklık Yönetim Planı, Nihai Rapor. T.C. Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, 1095s, Ankara.
- SYGM. 2023. Endüstriyel Su Verimliliği Rehber Dokümanları Serisi. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Svoboda, M., Hayes, M., Wood, D. 2012. Standardized Precipitation Index User Guide. World Meteorological Organization, WMO-No.1090.
- Şen, Z. 2015. *Applied Drought Modeling, Prediction, And Mitigation*. Elsevier. ISBN: 9780128024225
- Şen, Ö.L., Bozkurt, D., Göktürk, O.M., DüNDAR, B., Altürk, B. 2017. Türkiye’de İklim Değişikliği ve Olası Etkileri. Conference Paper, İstanbul.

- StackExchange, 2020. Standardized Precipitation Index with gamma function in GEE. Erişim Adresi: <https://gis.stackexchange.com/questions/363547>
- Yang, T.H. ve Liu, W.C. 2020. A General Overview of The Risk-Reduction Strategies for Floods and Droughts. Sustainability, 12, 2687.
- Thilagaraj, P., Masilamani, P., Venkatesh, R., Killivalavan, J. 2021. Google Earth Engine Based Agricultural Drought Monitoring In Kodavananar Watershed, Part Of Amaravathi Basin, Tamil Nadu, India. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B5-2021 XXIV ISPRS Congress
- Thom, H.C.S. 1958. A Note on the Gamma Distribution. Monthly Weather Review, 86, 117-122.
- Tigkas, D., Vangelis, H., Tsakiris, G. 2015. DrinC: a software for drought analysis based on drought indices. Earth Science Informatics, 8(3), 697-709. <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0178-y>
- TOB. 2021. 3 Pilot Havzada Nehir Havza Yönetim Planları Kapsamında Ekonomik Analizler ve Su Verimliliği Çalışmaları için Teknik Yardım Projesi. T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı.
- Turgu, E., Eskioğlu, O., Öz, Ö., Uğurlu, A. 2015. Farklı Zaman Ölçeklerindeki Standart Yağış İndekslerinin Havza Bazında Değerlendirilmesi. Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Ankara.
- TÜBİTAK MAM, 2016. Sanayide Temiz Üretim Olanaklarının ve Uygulanabilirliğinin Belirlenmesi (SANVER) Projesi, Final Rapor. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu, Marmara Araştırma Merkezi.
- Türkeş, M. 2008. Küresel İklim Değişikliği Nedir? Temel Kavramlar, Nedenleri, Gözlenen ve Öngörülen Değişiklikler. İklim Değişikliği ve Çevre, 1, 26-37.
- UN-SPIDER, 2022. Recommended Practice for Drought-monitoring: SPI. Erişim Adresi: <https://www.un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-drought-monitoring-spi/step-by-step>. Erişim Tarihi: 25.04.2025
- Wilks, D. S. 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Department of Earth and Atmospheric Sciences, Cornell University. ISBN
- Yacoub, E. ve Tayfur, G. 2020. Spatial and Temporal Variation of Meteorological Drought and Precipitation Trend Analysis over Whole Mauritania. Journal of African Earth Sciences, 163(1), 1-12.
- Yuan, Y. ve Zhou, W. 2008. Influences of The Indian Ocean Dipole on The Asian Summer Monsoon in the Following Year. International Journal of Climatology, 28(14), 1849-1859.