

GRACE/GRACE-FO Misyonu Toplam Su Kütlesi Değişimi ile Kuraklık Arasındaki İlişkinin İncelenmesi: Seyhan Havzası, Adana İli Örneği

Cansu Beşel Hatipoğlu^{1,*}

¹Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 57000, Sinop.

Özet

Kuraklık, ciddi su kıtlıklarına ve ekonomik kayıplara neden olabilecek en kötü doğal afetlerden biridir. GRACE ve GRACE-FO uydru misyonları kuraklığın değerlendirilmesinde kullanılabilecek önemli veri kaynakları sağlamaktadır. Bu çalışmada Adana ilindeki kuraklığın değerlendirilmesi amacıyla Seyhan Havzası için Nisan 2002-Eylül 2024 zaman aralığında GRACE ve GRACE-FO uydru misyonlarından alınan Toplam Su Kütlesi (Total Water Storage, TWS) verileri kullanılmıştır. Çalışma alanındaki kuraklık sürecini incelemek için ise 1964-2024 yılları arası aylık toplam yağış verileri kullanılarak Standartlaştırılmış Yağış İndisi (Standardized Precipitation Index, SPI) 1, 3, 6 ve 12 aylık dönemler için hesaplanmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde TWS ve SPI verileri ayrı ayrı analiz edilmiştir. Her iki veri setinde zaman içerisinde azalan yönde eğilimler olduğu görülmüştür. Çalışmanın ikinci bölümünde ise ülkemizde ciddi kuraklık olaylarının yaşandığı 2007-2008, 2013-2014, 2020-2021 ve 2023-2024 yılları arası olmak üzere toplam 4 dönem için TWS ve SPI değişimleri karşılaştırılmıştır. En yüksek korelasyon 2020-2021 döneminde TWS-SPI6 arasında 0.92, en düşük korelasyon ise 2023-2024 döneminde TWS-SPI6 arasında 0.23 olarak elde edilmiştir. Diğer yandan TWS verilerindeki negatif yöndeki trend ile kuraklık indisi arasında tutarlı ilişkiler bulunmuştur.

Anahtar Sözcükler

Kuraklık, GRACE/GRACE-FO, Toplam Su Kütlesi, Standartlaştırılmış Yağış İndisi

Investigation of the Relationship between Total Water Storage Changes from the GRACE/GRACE-FO Mission and Drought: A Case Study of the Seyhan Basin, Adana Province

Abstract

Drought is one of the most severe natural disasters that can lead to significant water shortages and economic losses. The GRACE and GRACE-FO satellite missions provide valuable data sources that can be used to assess drought. In this study, Total Water Storage (TWS) data from the GRACE and GRACE-FO satellite missions for the Seyhan Basin, covering the period from April 2002 and September 2024, were used to assess drought in Adana province. To examine the drought dynamics in the study area, the Standardized Precipitation Index (SPI) was calculated for 1, 3, 6, and 12-month timescales using monthly total precipitation data from 1964 to 2024. In the first part of the study, both TWS and SPI data were analyzed separately. Both datasets exhibited decreasing trends over time. In the second part of the study, TWS and SPI variations were compared for four distinct periods- 2007-2008, 2013-2014, 2020-2021, and 2023-2024- all characterized by severe drought in Türkiye. The highest correlation was 0.92 between TWS and SPI6 in the 2020-2021 period, while the lowest correlation was 0.23 between TWS and SPI6 during the 2023-2024 period. Additionally, consistent relationship was found between the negative trend in TWS and the drought indices.

Keywords

Drought, GRACE/GRACE-FO, Total Water Storage, Standardized Precipitation Index

1. Giriş

Türkiye, küresel ısınmanın etkileri açısından dünyadaki en riskli ülkeler grubunda yer almaktadır. Doğu Akdeniz ve İç Anadolu küresel ısınmadan en fazla etkilenecek bölgelerimizin başında gelmektedir. İklim değişikliğinin en önemli ve en görünür sonuçlarından biri kuraklıktır. Kuraklık birçok sektör üzerinde ciddi etkilere sahip olup, en fazla yaşamsal önem taşıyan tarım sektörünü etkilemektedir. Meteorolojik kuraklık, tarımsal kuraklık, hidrolojik kuraklık ve sosyoekonomik kuraklık olmak üzere dört farklı kategoride sınıflandırılmaktadır (Wilhite & Glantz, 1985). Meteorolojik kuraklık; yağış ve buharlaşmadaki dengesiz dağılım nedeniyle suyun yetersiz olduğu durumlarda ortaya çıkmaktadır (Palmer, 1965). Tarımsal kuraklık, toprak neminde azalma ile değerlendirilmektedir. Diğer yandan iklim değişikliği ve insan faaliyetleri tarımsal kuraklığı oldukça etkilemektedir (Tramblay vd., 2020). Hidrolojik kuraklık; nehir akımlarında azalma, yeraltı suyu rezervlerinin tükenmesi durumunda açığa çıkmaktadır.

Son olarak sosyoekonomik kuraklık; su eksikliğinin sosyoekonomik sistemleri etkilemesi sonucu üretim ve tüketimde aksamalara neden olması halinde ortaya çıkmaktadır. Akdeniz bölgesi, gelecekte özellikle sosyoekonomik açıdan artması beklenen kuraklık olaylarına karşı en savunmasız bölgelerden biri olarak kabul edilmektedir (Gu vd., 2020). Aynı şekilde Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli'nin Altıncı Değerlendirme Raporu'nda (IPCC AR6) Akdeniz bölgesinin kuraklık açısından yüksek riskli bir alan olarak sınıflandırıldığı görülmektedir (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). Gumus ve Algin (2017), Seyhan-Ceyhan Nehri Havzası'nda Standartlaştırılmış Yağış İndisi (Standardized Precipitation Index, SPI) ve Akarsu Kuraklık İndisi (Streamflow Drought Index, SDI) kullanarak meteorolojik ve hidrolojik kuraklık analizleri yapmıştır. Çalışmada, SPI ile ölçülen en şiddetli ve aşırı kuraklık 1972 yılında, SDI ile ölçülen en yüksek aşırı kuraklık ise 2001 yılında gözlemlenmiştir. Kuraklığın olumsuz etkilerini azaltmak için doğru planlamalar yapmak son derece önemlidir. Türkiye'de iklim değişikliği ile mücadele konusunda sürdürülebilir kalkınma ilkeleri çerçevesinde politikalar oluşturulmaktadır. Tarımsal kuraklığa yönelik olarak "Türkiye Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planı" 2008-2012 dönemi için hazırlanarak uygulamaya konulmuştur (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022). İlerleyen dönemde 23.07.2022 tarih ve 31901 sayılı Resmi Gazete'de "Tarımsal Kuraklık Yönetiminin Görevleri, Çalışma Usul ve Esaslarına Dair Yönetmelik" yayımlanmıştır. Yönetmelik kapsamında 2013-2017, 2018-2022 ve 2023-2027 dönemini kapsayan Türkiye Tarımsal Kuraklıkla Mücadele Stratejisi ve Eylem Planları hazırlanmıştır (T.C. Resmi Gazete, 2022). Burada amaçlanan toplumun bilinç düzeyini artırmak, tarımsal kuraklıkla etkin bir mücadele, geleceğe yönelik tedbirlerin alınması ve gerekli planlamaların yapılmasıdır.

GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) ve GRACE-FO (Follow-On) uydu misyonları Dünya'nın yerçekimi alanındaki değişimleri yüksek hassasiyetle ölçebilmekte olup bu ölçümleri kıtasal alanlarda Toplam Su Kütlesi (Total Water Storage, TWS) verilerine dönüştürmektedir (Ramillien vd., 2008). TWS verileri yeryüzünde bulunan tüm suyun toplam miktarını (yeraltı suyu, toprak nemi, kar, buz, yüzey suyu) ifade etmektedir. TWS ile yeraltı ve yüzey suyu bileşenlerinin zamansal değişimi bütüncül olarak değerlendirilebilmektedir. Okay Ahi ve Cekim (2021), GRACE ve GRACE-FO uydu misyonu Seviye 3 verilerini kullanarak 19 küresel havzada farklı tahmin modelleri ile TWS değişimlerini incelemiştir. Çalışmada bazı küresel havzalarda sürekli negatif veya pozitif TWS eğilimleri görülmüştür. Zhang vd. (2019) yağış ve TWS ilişkisini araştırmıştır. TWS eğilimlerinin bölgesel dağılımının yağış eğilimleri ile küresel ölçekte benzerlik gösterdiğini görmüştür. Türkiye'nin farklı havzalarında da TWS değişimlerinin incelendiği çalışmalar mevcuttur (Lenk, 2013; Karasu, 2019; Okay Ahi, 2021; Öztürk, 2022; Bektaşoğlu, 2024). Yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere, GRACE ve GRACE-FO uydu misyonları küresel ve bölgesel ölçekte su kaynaklarındaki değişiminin izlenmesinde önemli bir veri kaynağı niteliğindedir. Bu veriler ile yeraltı suyundaki azalmalar ve su kütlesi anomalileri gözlemlenerek kuraklığın erken tespiti ve kuraklık şiddetinin incelenmesine olanak sağlanmaktadır. TWS su dengesini doğrudan temsil eden unsurdur ve kuraklık döneminde su kaybının değerlendirilmesi açısından önemlidir. Yapılan çalışmalar GRACE uydularından sağlanan TWS verilerini kullanarak kuraklığın daha iyi belirlenebileceğini göstermiştir (Houborg vd., 2012; Long vd., 2013; Vishwakarma, 2020). Liu vd. (2024) GRACE verilerini kullanarak yeraltı suyu kuraklığını belirlemiştir. Çalışmada meteorolojik kuraklık ile yeraltı suyu kuraklığı arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmüştür. Cui vd. (2024), 2002-2017 yılları arasındaki yağış kaynaklı meteorolojik kuraklık ve TWS tabanlı hidrolojik kuraklık arasındaki ilişkiyi incelemiş olup meteorolojik kuraklığın TWS kaynaklı hidrolojik kuraklığın tetikleyicisi olduğu sonucuna varmıştır. Duan vd. (2024), 2022 yılında Yangtze Nehri havzasında gerçekleşen aşırı kuraklık olayının neden olduğu su kütlesindeki değişiklikleri GRACE ve GRACE-FO verilerini kullanarak incelemiştir. Çalışmada kuraklığın yayılma süreçlerini SPI ve Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndisi (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) ile gözlemlemiştir. Han vd. (2023), GRACE uydusuna dayalı TWS verilerini kullanarak meteorolojik kuraklığın hidrolojik kuraklığı hangi aşamada tetiklediğini araştırmak için yeni bir yaklaşım önermiştir. Çalışmada, tetik eşiğinin değişimini etkileyen en önemli faktörün sıcaklık artışı olduğu görülmüştür. Al-Abadi vd. (2024), GRACE TWS verilerinin meteorolojik ve topoğrafik parametrelerle birlikte kullanılmasının kuraklık duyarlılığının belirlenmesinde etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir.

Ülkemizde kuraklık üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunlukla çeşitli kuraklık indislerinin hesaplanması ile meteorolojik ve hidrolojik kuraklıkların incelenmesi üzerine olduğu görülmüştür (Topçu & Seçkin, 2016; Bacanlı & Akşan, 2019; Dikici, 2019; Dikici, 2020; Aktürk vd., 2022; Baykal vd., 2023; Çelik & Yakar, 2024; Zeybekoglu, 2025). Buna karşılık, TWS değişimlerini gösteren GRACE ve GRACE-FO tabanlı kuraklık çalışmaları sınırlı sayıda kalmıştır. Okay Ahi ve Jin (2019), 2002-2016 yılları arası GRACE uydu misyonu TWS verilerinin kuraklıkla ilişkisini incelemiştir. Bunun için Global Land Data Assimilation System (GLDAS) hidrolojik modelleri, Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) yağış verileri ve kuraklık indisleri (Palmer Drought Severity (SCPDSI), El Niño–Southern Oscillation (ENSO)) kullanmıştır. Çalışma sonucunda Türkiye'de önemli kuraklık olaylarının yaşandığı ve bu durumun TWS değişiminde yaşanan belirgin azalmalar ile örtüştüğü görülmüştür. Bu çalışmada ise GRACE ve GRACE-FO uydu misyonlarından elde edilen TWS verileri kullanılarak, Seyhan Havzası'nda bulunan Adana ili için kuraklığın incelenmesi ve GRACE ve GRACE-FO uydu misyonu verilerinin kuraklık izleme çalışmalarına katkısının ortaya konması amaçlanmıştır. Bu amaçla TWS verileri ile yağışa dayalı kuraklık indisi olan SPI arasındaki ilişki irdelenmiştir. Bu kapsamda çalışmanın ikinci bölümünde SPI indisinin hesaplanma süreci açıklanmıştır. Ardından üçüncü bölümde Adana ili çalışma alanı ve kullanılan veriler sunulmuştur. Çalışmanın dördüncü bölümde, ülkemizde ciddi kuraklık olaylarının görüldüğü dönemlerde GRACE/GRACE-FO uydu misyonları TWS değişimleri ve SPI kuraklık indisi arasındaki ilişki incelenmiştir. Son bölümde ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Yöntem

2.1. Standartlaştırılmış Yağış İndisi

SPI, literatürde yaygın olarak kullanılan yağışa dayalı kuraklık indisi (McKee vd., 1993). SPI,

$$SPI = \frac{(X_i - \bar{X}_i)}{\sigma} \quad (1)$$

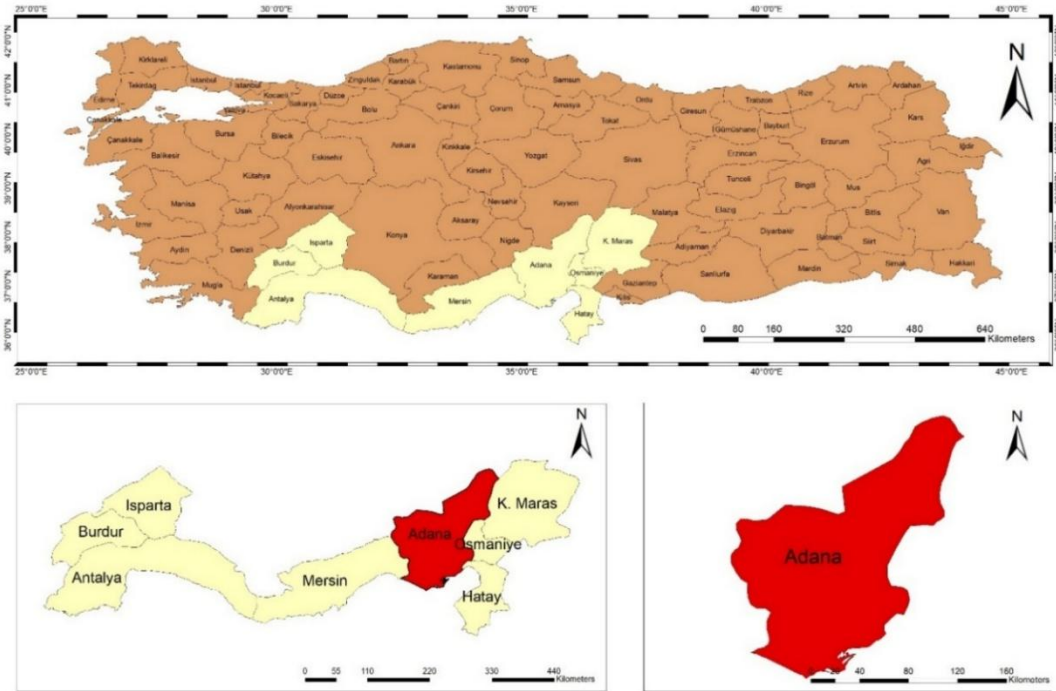
şeklinde ifade edilir. Burada X_i i. aydaki yağış, $\bar{X}_i$ yağışın ortalaması, σ ise deneysel standart sapmayı ifade etmektedir. SPI indisinin hesabında en az 30 yıllık yağış verisi gerekmekte olup, indis değerleri 1, 3, 6, 9, 12, 24 ve 48 aylık zaman ölçeklerinde hesaplanabilmektedir. Bu indise göre kuraklık sınıflandırması Tablo 1’de gösterilmiştir. Indis değerinin negatif olduğu ilk ay kuraklığın başlangıcı olarak kabul edilirken pozitif döndüğü ay ise kuraklığın bitişi olarak kabul edilmektedir.

Tablo 1: SPI indisi kuraklık sınıflandırması

Sınıflandırma	SPI İndisi
Aşırı Nemli	≥ 2
Şiddetli Nemli	1.5 ~ 1.99
Orta Nemli	1 ~ 1.49
Hafif Nemli	0 ~ 0.99
Hafif Kuraklık	0 ~ -0.99
Orta Kuraklık	-1 ~ -1.49
Şiddetli Kuraklık	-1.5 ~ -1.99
Aşırı Kuraklık	≤ -2

3. Çalışma Alanı ve Veri

Çalışma kapsamında, ülkemizde tarımsal üretim açısından önemli bir yere sahip olan Akdeniz bölgesindeki Adana (35°—38°N, 34°—36°E) ili çalışma alanı olarak alınmıştır (Şekil 1). İlin yüz ölçümü yaklaşık 13.844 km² olup %35’i tarım arazilerinden oluşmaktadır. En verimli ovalarımızdan biri olan Çukurova birçok tarımsal ürünün üretiminde rol oynamaktadır. Verimli alüvyal topraklar, Seyhan ve Ceyhan nehirleri sayesinde yılda birkaç ürün hasat edilebilmektedir. Akdeniz iklimi hakim olan ilde yaz mevsimi sıcak, kış mevsimi ise ılıman geçmektedir. Ortalama yağış 625 mm civarındadır.



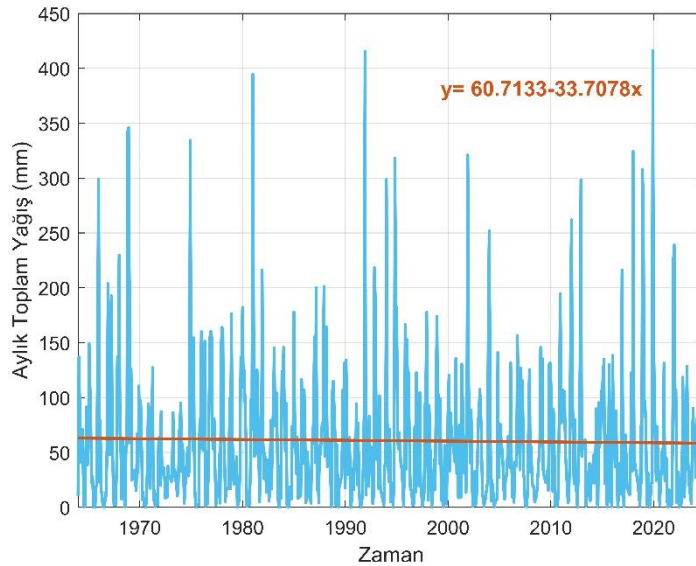
Şekil 1: Çalışma alanı

3.1. GRACE ve GRACE-FO Toplam Su Kütlesi Verisi

Çalışmada GRACE ve GRACE-FO misyonlarından elde edilen TWS verilerinin kuraklık ile ilişkisi incelenmiştir. 2002 yılında fırlatılan GRACE uydusu misyonu 2017 yılında görevini tamamlamış olup 2018 yılından itibaren GRACE-FO uydusu misyonundan veri sağlanmaktadır. Bu çalışmada TWS verileri TELLUS_GRAC-GRFO_MASCON_CRI_GRID_RL06.3_V4 veri setinden alınmıştır. Bu veri seti Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından Mascon çözümü kullanılarak işlenen gridli aylık küresel su kütlesi ve yükseklik anomalilerini içermektedir (Wiese vd., 2023). Veri seti Nisan 2002 tarihinden günümüze kadar olan verileri içermektedir. Aynı zamanda Coastal Resolution Improvement (CRI) filtresi uygulanarak kıyı şeritleri boyunca sinyal sızıntısı hataları azaltılmıştır. Veriler netCDF formatında olup santimetre (cm) birimindedir. Tam Mascon çözümü ayrı masconların eşit alanlı 3°'lik gridleri kullanılarak 4551 bağımsız yüzey kütlesi değişimi tahmininden oluşmaktadır. Bu çalışmada Adana ilini kapsayan Seyhan havzası için Nisan 2002-Eylül 2024 zaman aralığında, GRACE ve GRACE-FO uydularından sağlanan TWS verileri kullanılmıştır.

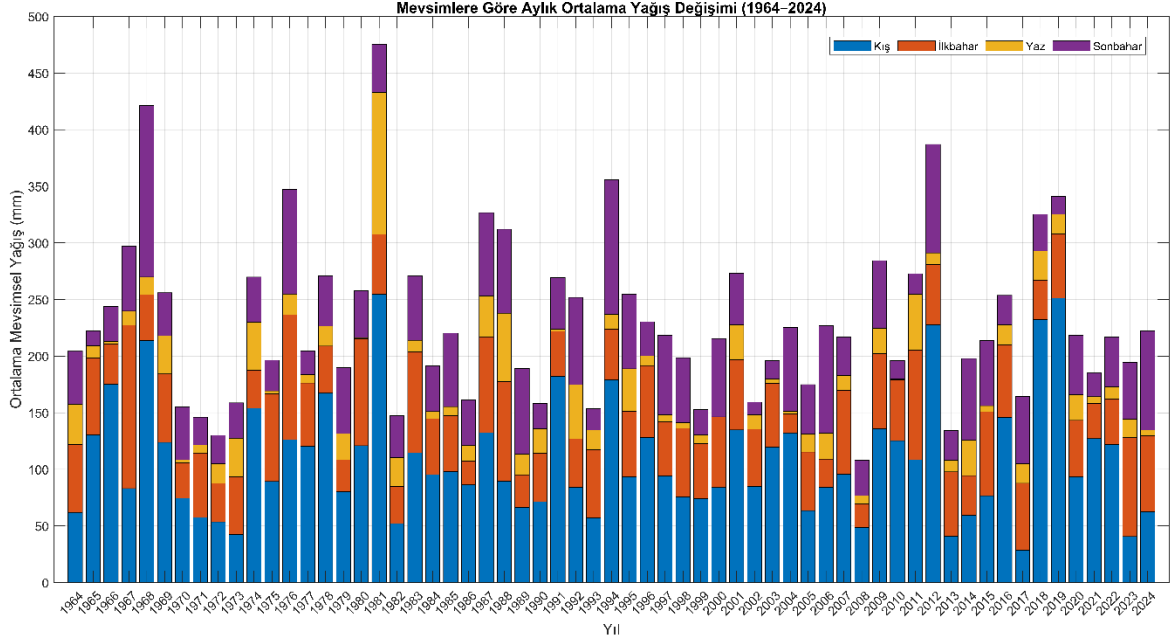
3.2. Aylık Toplam Yağış Verisi

SPI kuraklık indisinin hesabında kullanılmak üzere Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden 1964-2024 yılları arası aylık toplam yağış verileri temin edilmiştir. Şekil 2'de aylık toplam yağışın zamana bağlı değişimi gösterilmiştir. Buna göre aylık toplam yağışın zaman içerisinde azaldığı görülmüştür. Trend eğimi -33.7078 mm/ay olarak hesaplanmıştır. Maksimum yağış 2019 yılının Aralık ayında 416 mm, minimum yağış Temmuz 1984, Mayıs 1989, Temmuz 1991 ve Ağustos 2012 tarihinde 0.1000 mm civarındadır.



Şekil 2: Adana ili aylık toplam yağış zaman serisi

Şekil 3'te aylık toplam yağışın mevsimlere göre dağılımı gösterilmiştir. Kış mevsiminde maksimum, minimum ve ortalama yağış sırasıyla 254.6330 mm, 28.6000 mm ve 108.6639 mm olarak bulunmuştur. İlkbahar mevsiminde maksimum yağış 144.2000 mm, minimum yağış 16.7333 mm iken ortalama yağış 55.2937 mm'dir. Yaz mevsimine gelindiğinde ise maksimum yağış 125.3000 mm, minimum yağış 1.0500 mm ve ortalama yağış 18.9106 mm'dir. Sonbahar mevsiminde maksimum yağış 151.7000 mm, minimum yağış 11.2000 mm ve ortalama yağış 48.8246 mm'dir (Tablo 2). Ortalama yağışlara bakıldığında en fazla yağış kış mevsiminde ardından ilkbahar ve sonbahar mevsiminde görülmüştür.



Şekil 3: Adana ili aylık ortalama yağışın mevsimlere göre değişimi

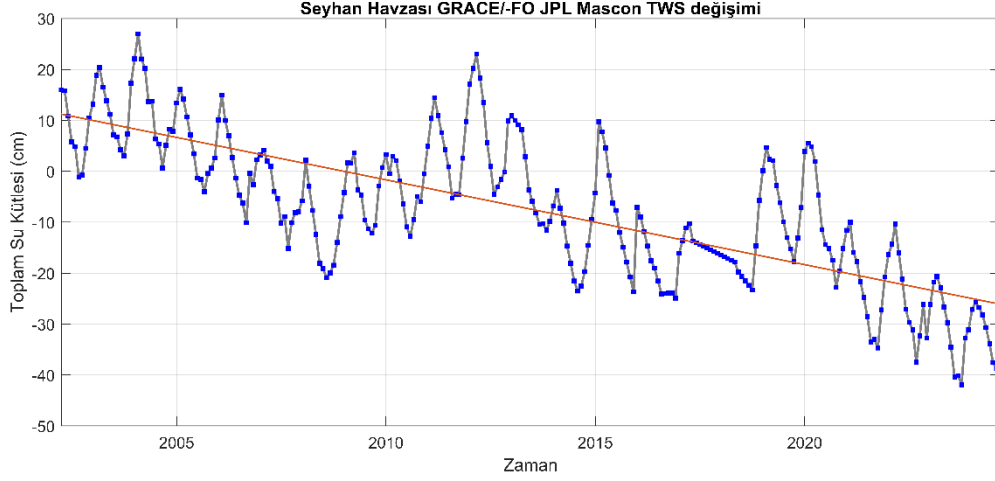
Tablo 2: Aylık ortalama yağış istatistikleri

Mevsimler	Maksimum (mm)		Minimum (mm)		Ortalama (mm)
	Yağış	Yıl	Yağış	Yıl	Yağış
Kış	254.6330	1981	28.6000	2017	108.6639
İlkbahar	144.2000	1967	16.7333	2004	55.2937
Yaz	125.3000	1981	1.0500	2010	18.9106
Sonbahar	151.7000	1968	11.2000	2002	48.8246

4. Bulgular ve Tartışma

4.1. GRACE ve GRACE-FO Toplam Su Kütlesi Değişimi

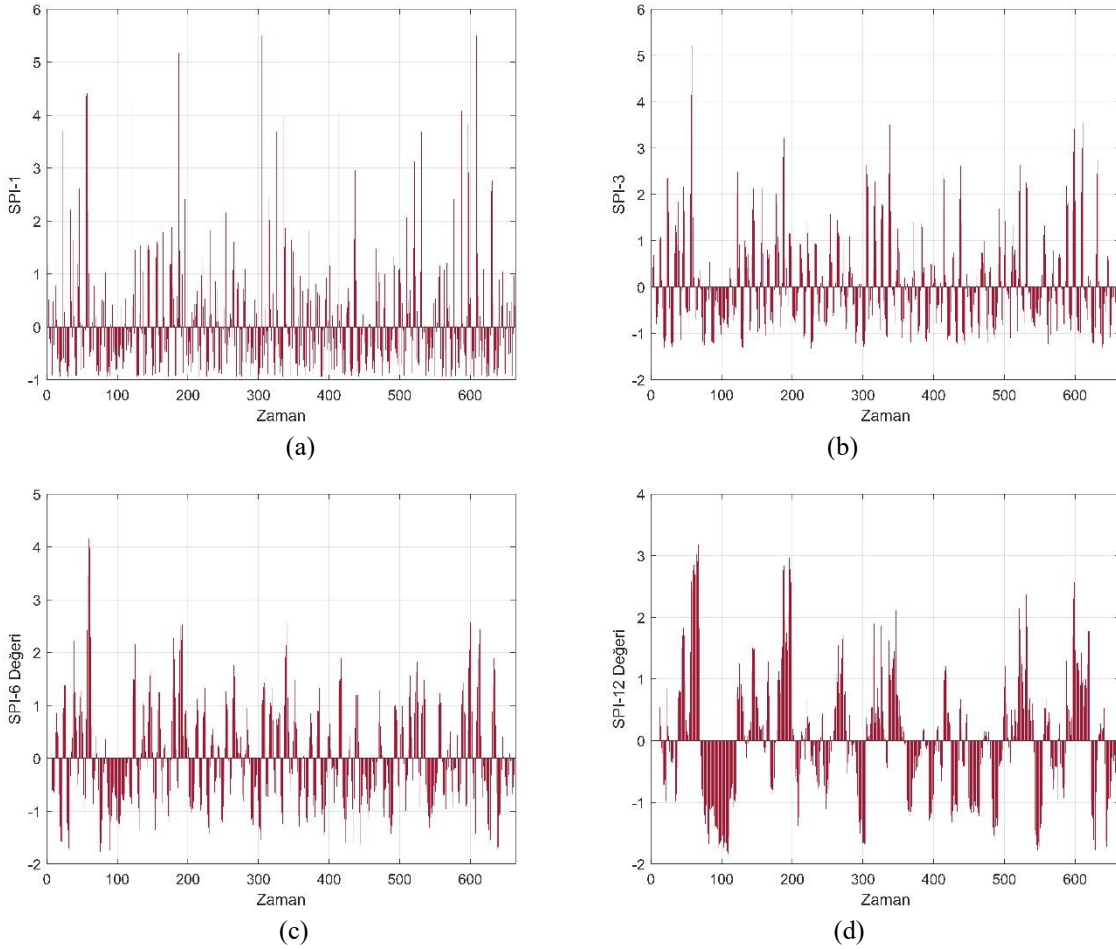
Bu bölümde Seyhan havzası için Nisan 2002-Eylül 2024 yılları arasındaki TWS verilerinin zaman içerisinde gösterdiği değişim incelenmiştir. Veri setinde 34 aylık boşluk bulunmaktadır. Veri setindeki boşluk yaklaşık %62 oranında GRACE uydusu misyonunun olduğu döneme (2002-2017) aittir. Bu dönemde toplam 21 ay veri boşluğu mevcuttur. Genel olarak her yıl için bir veya iki aylık boşluklar vardır. Diğer yandan GRACE misyonundan GRACE-FO misyonuna geçiş sürecinde 11 ay veri boşluğu bulunmaktadır. GRACE-FO uydusu misyonu döneminde ise (Haziran 2018-Eylül 2024) 2 aylık boşluk mevcuttur. Bu çalışmada veri boşluğu doğrusal enterpolasyon yöntemiyle doldurulmuştur. Ardından TWS'nin zaman içerisinde göstermiş olduğu değişim basit doğrusal regresyon analizi ile incelenmiştir. Şekil 4'te, Nisan 2002-Eylül 2024 zaman aralığında TWS verileri azalan yönde eğilim göstermektedir. Trend eğimi -177.7473 cm/ay olarak elde edilmiştir. Özellikle 2020 yılı sonrasında sürekli olarak bir azalma mevcuttur. Maksimum TWS Şubat 2004 tarihinde 26.9522 cm, minimum TWS Ekim 2023 tarihinde -41.8856 cm'dir.



Şekil 4: Seyhan Havzası GRACE ve GRACE-FO TWS verisi zamansal değişimi

4.2. SPI Kuraklık İndisinin Hesaplanması

Adana ili için SPI indisi 1964-2024 yılları arasında 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde hesaplanmıştır. SPI-1, SPI-3, SPI-6 ve SPI-12 dönemlerindeki birikimli yağışların deneysel standart sapması sırasıyla 64.5051 mm, 135.7789 mm, 184.8276 mm ve 207.8751 mm olarak hesaplanmıştır. Elde edilen SPI indis değerlerinin zamana bağlı değişimleri incelenerek Tablo 1'deki sınıflandırma aralıklarına göre kurak ve nemli dönemler belirlenmiştir. Şekil 5'te 1,3,6 ve 12 aylık SPI indisi değerleri gösterilmiştir.

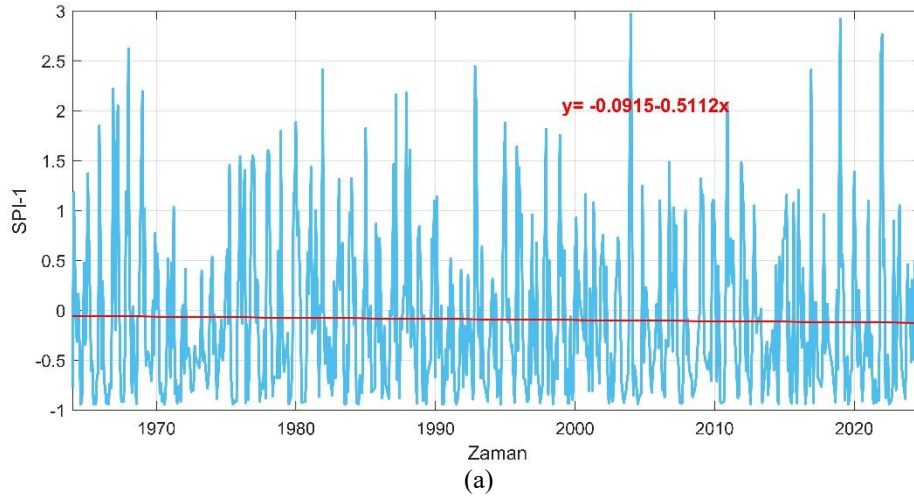


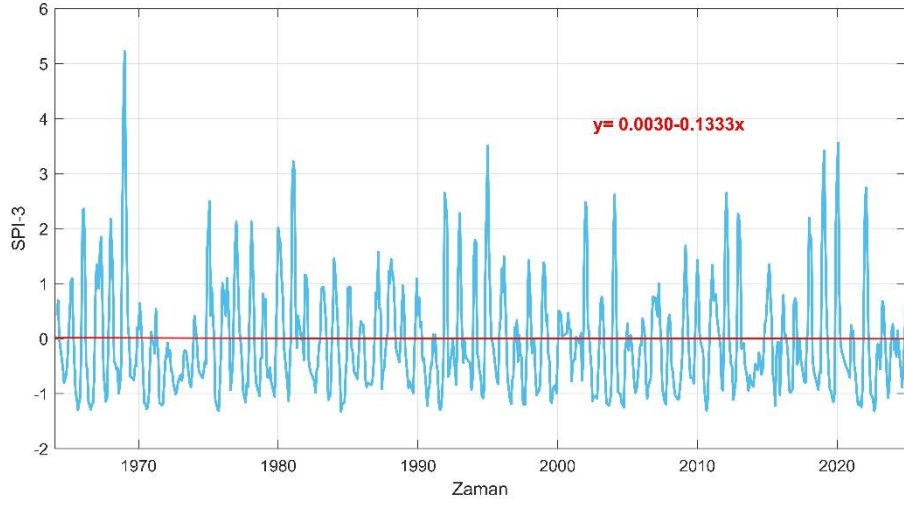
Şekil 5: SPI indis değerleri ((a) 1-Aylık SPI, (b) 3-Aylık SPI, (c) 6-Aylık SPI, (d) 12-Aylık SPI)

Tablo 3: Adana ili kuraklık karakteristikleri

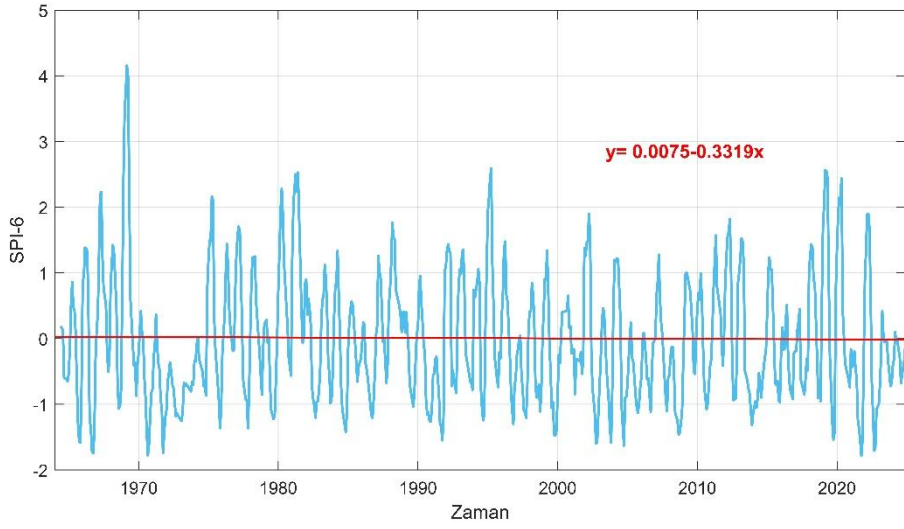
İndis	Periyot	Maksimum Kuraklık		Kuraklık Sayısı (Ay)			En Uzun Süreli Kuraklık		
		Şiddet	Zaman	Aşırı Kurak	Şiddetli Kurak	Orta Kurak	Süre (Ay)	Başlangıç	Bitiş
SPI	1 ay	-0.9412	07/2022	0	0	0	-	-	-
	3 ay	-1.3257	07/1984	0	0	81	5	06/1966 06/1970 06/2022	10/1966 10/1970 10/2022
	6 ay	-1.7863	10/2021	0	18	82	3	09/2021	11/2021
	12 ay	-1.8757	04/1972	0	38	76	12	04/1971	03.1972

Tablo 3'te Adana iline ait kuraklık karakteristikleri verilmiştir. Maksimum kuraklık değerlerine bakıldığında; SPI-1 döneminde normale yakın hafif kuraklık, SPI-3'te orta, SPI-6'da ve SPI-12'de şiddetli kuraklık görülmüştür. Kuraklık sayısı irdelendiğinde; 1,3,6 ve 12 aylık zaman ölçeklerinde aşırı kuraklık olayı görülmemiştir. SPI-6'ya göre 18 ay şiddetli kuraklık, SPI-12'ye göre 38 ay şiddetli kuraklık olayı tespit edilmiştir. Orta düzeyde kuraklık olaylarına bakıldığında; SPI-3 döneminde 81 ay, SPI-6 döneminde 82 ay, SPI-12 döneminde 76 ay şeklindedir. Orta düzeyde kuraklık en az SPI-12 döneminde görülmüştür. Bunun nedeni SPI indisinde zaman ölçeği arttıkça kısa süreli ve orta şiddetteki kuraklık olaylarının daha şiddetli kuraklık sınıflarında birleşmesi olarak düşünülmektedir. Bu nedenle 12 aylık birikimli yağış verisini içeren SPI-12 döneminde orta kuraklık sınıfındaki ayların sayısı azalmakta ve SPI-6 dönemine göre şiddetli kuraklık sayısı fazla olmaktadır. Bunun yanında SPI-1 döneminde kuraklık olayı tespit edilememiştir. En uzun süreli kuraklık olayları incelendiğinde; SPI-3 için farklı dönemlerde olmak üzere üç kere 5 ay süren orta kuraklıklar görülmüştür. SPI-6 için 3 ay süren şiddetli kuraklık, SPI-12 için ise 12 ay süren orta kuraklık meydana gelmiştir. Şekil 6'da 1,3,6,12 aylık dönemlerde SPI indisinin zamansal değişimi gösterilmiştir. SPI indisinin tüm dönemlerdeki zaman serilerinde azalan yönde eğilimler görülmüştür. SPI-1, SPI-3, SPI-6 ve SPI-12 dönemleri için trend eğimleri sırasıyla -0.5112 ay^{-1} , -0.1333 ay^{-1} , -0.3319 ay^{-1} , -0.7226 ay^{-1} olarak hesaplanmıştır. SPI-1 döneminde normale yakın hafif kuraklık hâkim olduğundan çalışmanın ilerleyen aşamasına dahil edilmemiştir.

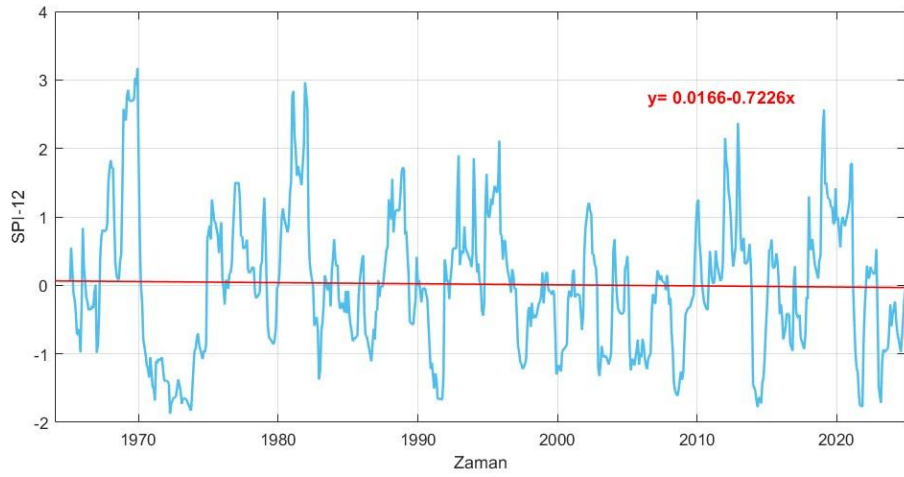




(b)



(c)

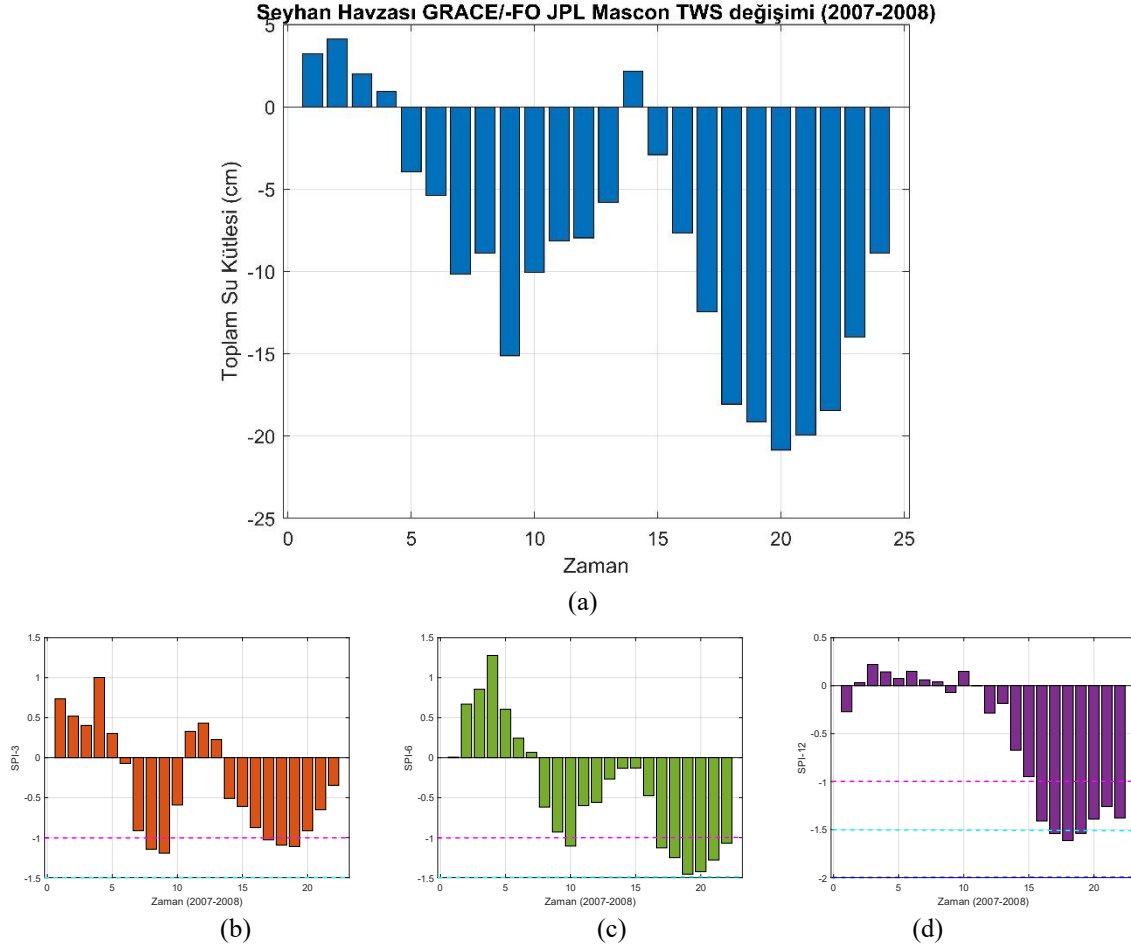


(d)

Şekil 6: SPI-1 (a), SPI-3 (b), SPI-6 (c) ve SPI-12 (d) zaman serisi

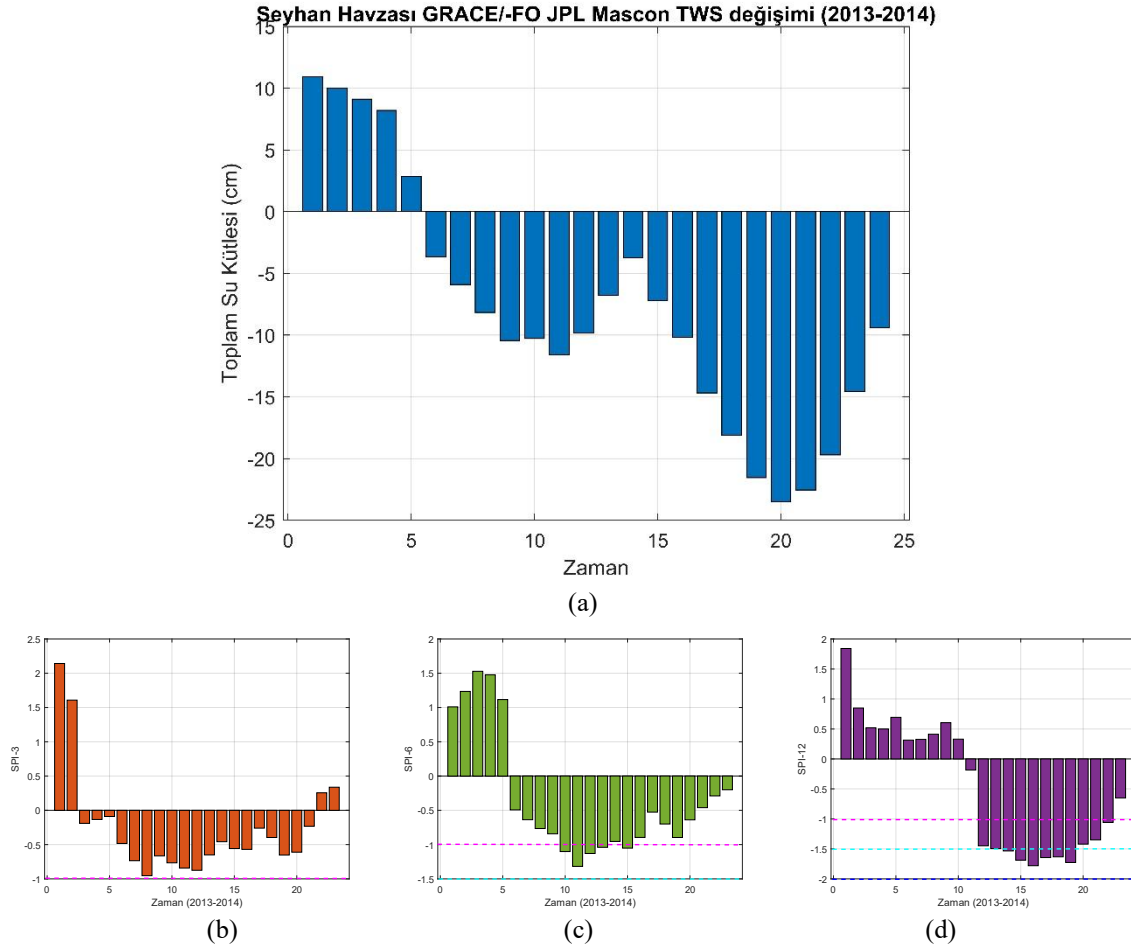
4.3. GRACE ve GRACE-FO Toplam Su Kütlesi ve SPI İndisi ile Kuraklığın Değerlendirmesi

Adana iline bakıldığında yağış, SPI ve TWS verilerinin tamamında azalan yönde trendler mevcuttur. Yağış, SPI ve TWS parametreleri birbiri ile ilişkili olmakla beraber kuraklığın bir göstergesi olmaktadır. Çalışmada Türkiye’de ciddi kuraklıkların yaşandığı 2007-2008, 2013-2014, 2020-2021 ve 2023-2024 yılları arası olmak üzere toplam 4 dönem halinde SPI (3,6 ve 12 aylık) ve TWS değişimleri incelenmiştir.



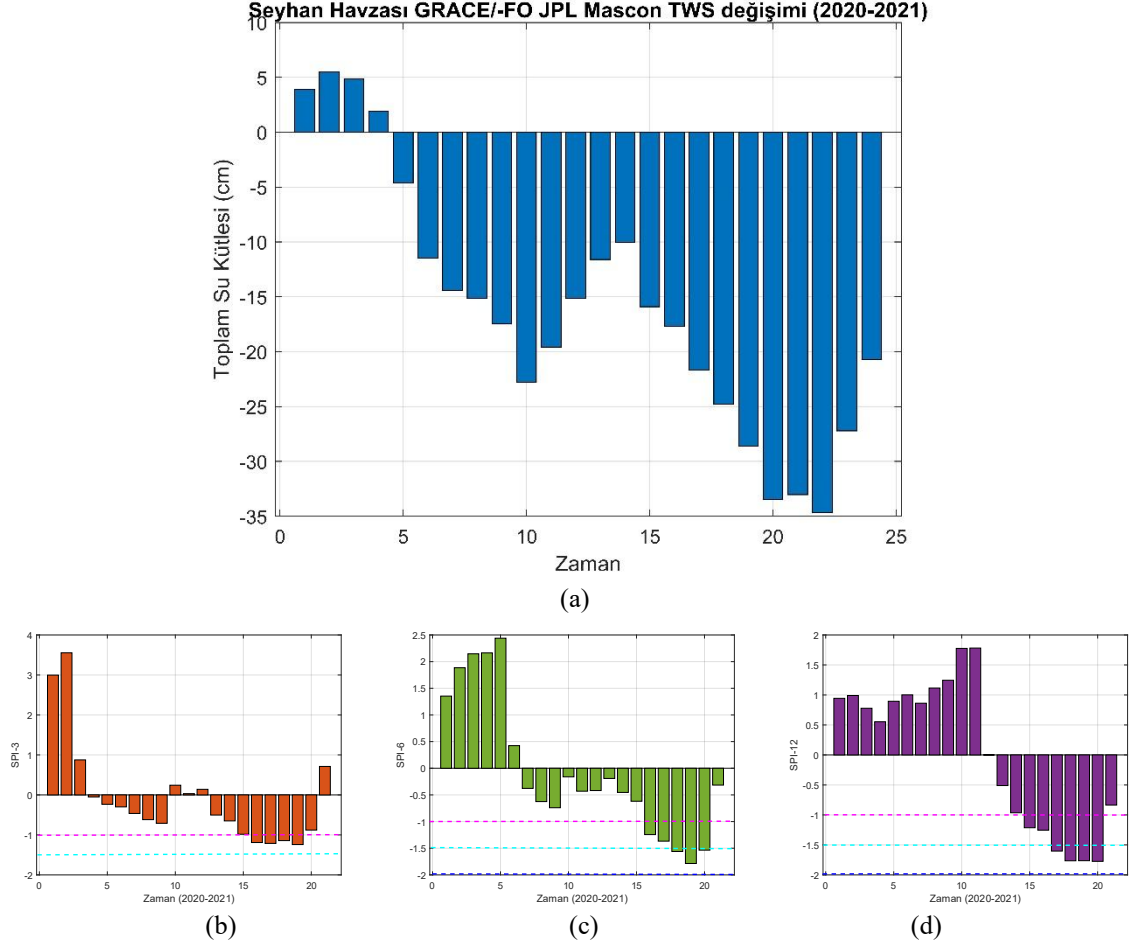
Şekil 7: 2007-2008 yılları arası (a) TWS (b) SPI-3, (c) SPI-6, (d) SPI-12 değişimleri

Şekil 7’de 2007-2008 yılları arasındaki TWS ve SPI değişimleri gösterilmiştir. TWS grafiğinde iki yıllık sürecin 19 ayında negatif yönde eğilimler mevcuttur. Özellikle 2008 yılında toplam su kütlesinde 11 ay negatif yönde eğilim olduğundan daha fazla azalma yaşandığı görülmektedir. En düşük TWS değeri -15.1272 cm ile 2007 yılı Eylül ayında iken, 2008 yılına gelindiğinde -20.8623 cm ile Ağustos ayındadır. SPI-3, SPI-6 ve SPI-12 kuraklık indisi değerlerine bakıldığında ise aynı şekilde 2008 yılında negatif yönde değerler elde edilmiş olup kuraklık olaylarının yaşandığı görülmektedir. SPI-3 ve SPI-6 dönemlerinde hafif ve orta düzeyde kuraklıklar, SPI-12 döneminde ise hafif, orta ve şiddetli kuraklıklar meydana gelmiştir. TWS ve SPI ile elde edilen sonuçlar birbiri ile tutarlıdır. Hem toplam su kütlesinin azalması hem de SPI indisi değerlerinin negatif olması kuraklığın göstergesidir. Diğer yandan TWS değişimlerinin SPI-3 kuraklık indisine hızlı şekilde yanıt verdiği görülmüştür. Şekil 8’de 2013-2014 yılları arasındaki değişimler sunulmuştur.



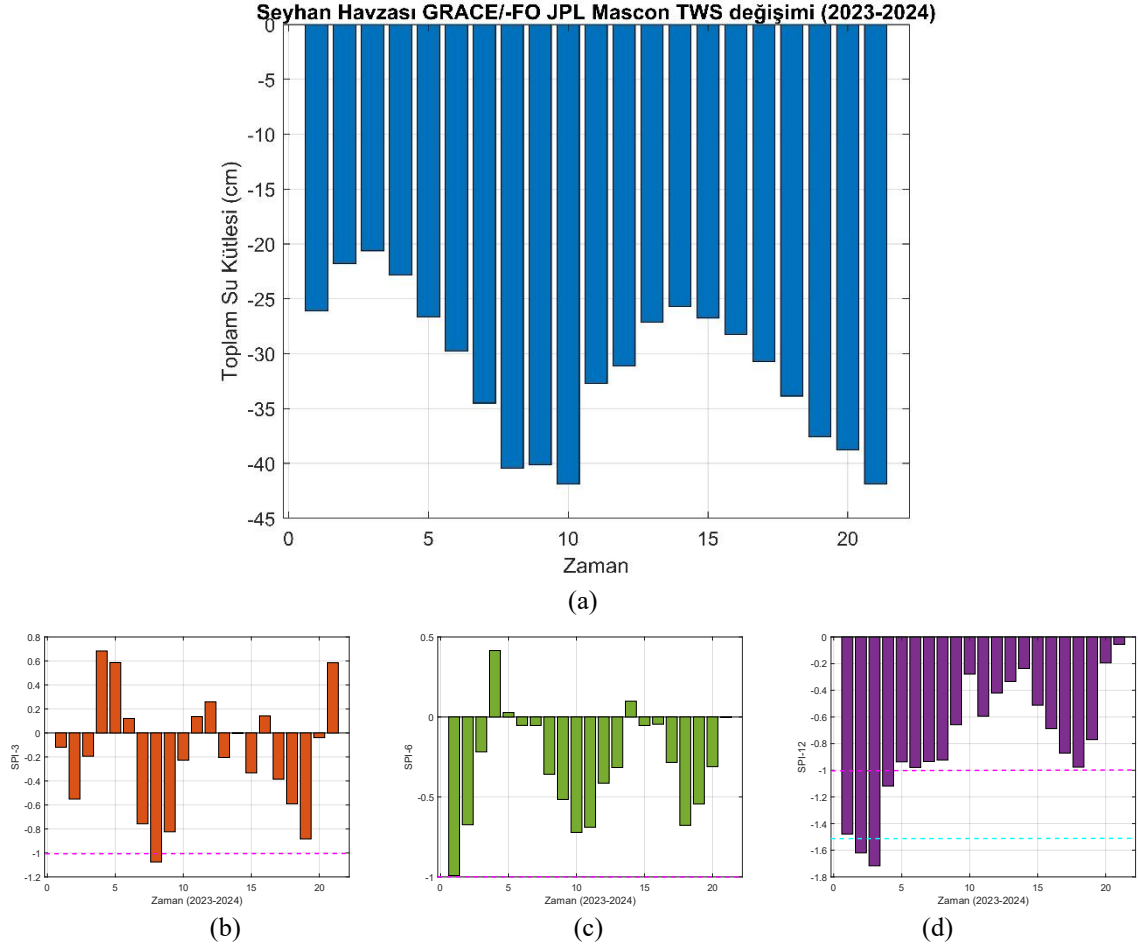
Şekil 8: 2013-2014 yılları arası (a) TWS (b) SPI-3, (c) SPI-6, (d) SPI-12 değişimleri

TWS değişimlerine bakıldığında 2013 yılının ilk beş ayı haricinde azalan yönde eğilim mevcuttur (Şekil 8(a)). Özellikle 2014 yılının tüm aylarında negatif yönde eğilim vardır. 2013 yılında en düşük TWS değeri -11.5855 cm ile Kasım ayında, 2014 yılında ise -23.5101 cm ile Ağustos ayında olmuştur. SPI-3 dönemi incelendiğinde ani yağış değişimlerine karşı duyarlı olduğu açıktır. TWS'nin ise bu değişime hızlı tepki veremediği görülmüştür. Bunun yanında TWS değişimleri ile SPI-6 arasında daha tutarlı bir ilişki vardır. Bu durumun nedeni, TWS'nin yeraltı suyu, toprak nemi, yüzey suyu gibi bileşenlerin birikimli etkisini yansıtmaması ve yağıştaki kısa süreli dalgalanmalar yerine orta vadeli hidrolojik süreçlere daha duyarlı olması olabilir. SPI değişimleri incelendiğinde ise; hem 2013 hem 2014 yıllarında kuraklık görülmüştür. SPI-3 döneminde hafif düzeyde kuraklık, SPI-6 döneminde hafif ve orta kuraklık, SPI-12 döneminde ise hafif, orta ve şiddetli kuraklık olayları mevcuttur. Bu dönemde de TWS ile SPI sonuçları birbirini doğrular niteliktedir. Bir diğer dönem olan 2020-2021 yılları arasındaki değişim Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 9: 2020-2021 yılları arası (a) TWS (b) SPI-3, (c) SPI-6, (d) SPI-12 değişimleri

Şekil 9 incelendiğinde, 2020-2021 yılları TWS verileri 2020 yılının ilk dört ayı hariç negatif yöndedir. Özellikle 2021 yılının tüm aylarında negatif yönde TWS hakimdir. Her iki yılda en düşük TWS değeri sırasıyla -22.7687 cm ve -34.6660 cm olarak Ekim ayında görülmüştür. TWS ile SPI ilişkisi incelendiğinde, 2020-2021 yılları için TWS ve SPI-6 döneminin daha uyumlu olduğu açıktır. SPI-3 döneminde 2020-2021 arasında toplam 14 ayda negatif, SPI-6 döneminde ise 15 ayda negatif iken SPI-12 döneminde sadece 2021 yılı için negatif değerler mevcuttur. SPI-3 ve SPI-6 dönemlerinde ağırlıklı olarak hafif kuraklık, SPI-12 döneminde hafif, orta ve şiddetli kuraklık görülmüştür. 2021 yılında SPI-6 ve SPI-12 değerleri TWS gibi sürekli olarak negatif yöndedir. TWS'nin belirgin olarak azaldığı bu yıl da kuraklık şiddeti artmıştır. Son olarak 2023-2024 yılları arası TWS ve SPI değişimleri incelenmiştir (Şekil 10).



Şekil 10: 2023-2024 yılları arası (a) TWS (b) SPI-3, (c) SPI-6, (d) SPI-12 değişimleri

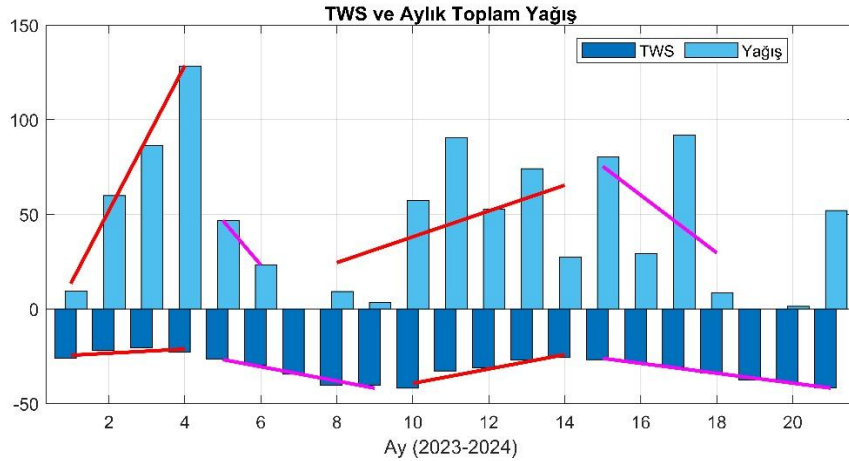
2023-2024 yıllarında TWS değerlerinin tamamı negatif değere sahiptir. Özellikle 2024 yılının Şubat ayından Eylül ayına kadar sürekli bir azalma olduğu görülmektedir. 2023 yılında en düşük TWS -41.8856 cm ile Ekim ayında iken 2024 yılında -41.8469 cm ile Eylül ayındadır. SPI-3 ve SPI-6 dönemlerinde hafif kuraklık varken SPI-12 döneminde hafif, orta ve şiddetli kuraklıklar mevcuttur. SPI-3 ve SPI-6 dönemlerinde kurak olmayan aylar görülmüşken SPI-12 döneminde tüm aylar kurak olarak bulunmuştur. Son olarak TWS ile farklı dönemlerdeki SPI indisi değerlerini karşılaştırmak için Pearson korelasyon katsayısı hesaplanmıştır (Tablo 4).

Tablo 4: TWS ve SPI indisi arasındaki korelasyon

TWS & SPI	Korelasyon Katsayısı			
	2007-2008	2013-2014	2020-2021	2023-2024
TWS—SPI-3	0.85	0.56	0.78	0.69
TWS—SPI-6	0.81	0.76	0.92	0.23
TWS—SPI-12	0.70	0.74	0.77	-0.28

SPI-3 ve SPI-6 zaman ölçeklerinin TWS ile daha uyumlu olduğu belirlenmiştir. En yüksek korelasyon 2020-2021 döneminde TWS—SPI-6 arasında 0.92 olarak bulunmuştur. En düşük korelasyon ise 2023-2024 döneminde TWS—SPI-6 arasında 0.23 olarak elde edilmiştir. Diğer yandan 2007-2008 ve 2020-2021 dönemlerinde en düşük korelasyon TWS—SPI12 arasında görülmüştür. TWS verileri, yağıştaki değişime birkaç aylık süreçte yanıt vermektedir. Fakat SPI-12 daha uzun süreli kuraklık koşullarını temsil etmektedir.

Dolayısıyla uzun dönemli olduğundan kısa süreli hidrolojik değişimleri bastırabilir ve bu durumda korelasyon azalabilir. 2023-2024 döneminde TWS—SPI-12 arasında hem zayıf hem de negatif yönlü korelasyon bulunmuştur. Elde edilen bu sonucu kapsamlı olarak değerlendirmek için aynı dönemdeki yağış verisi ile TWS karşılaştırılmıştır (Şekil 11).



Şekil 11: 2023-2024 yılları arası TWS ve aylık toplam yağış

2023-2024 döneminde TWS ve yağış arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Yağışın arttığı dönemlerde TWS’de artmaktadır. Fakat SPI-12 zaman ölçeği 12 aylık kümülatif yağışı temsil etmektedir. TWS’nin her bir değeri ise aylık depolamayı temsil etmektedir. Bu açıdan TWS ile SPI-12 arasındaki zayıf ve ters ilişkinin uzun dönemli ortalama kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Yağışın artması ile beraber SPI indisinin artması beklenen bir durum olmakla beraber TWS’deki düşüşün önceki dönemdeki kuraklıkla beraber yeraltı suyu rezervinin boşalmış olabileceği düşünülebilir. Çalışmada bazı dönemlerde TWS verisi ile SPI indislerinin tepki sürelerinin farklı olduğu, yani pozitif ve negatif eğilimlerin gecikmeli şekilde tutarlı olduğu görülmüştür. Bu durumun değişkenlerin hidrolojik tepki süresindeki farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yağışın azalması toprak nemi ve yüzey suyu daha hızlı etki yaratmaktadır. Dolayısıyla bu bileşenleri içeren TWS verisi ile sadece yağış bileşenini içeren SPI arasında zamansal fark oluşmaktadır. Diğer yandan TWS verisindeki veri boşluklarının doğrusal enterpolasyon yöntemi ile doldurulması uzun dönemli hidrolojik değişimlerin korunmasını sağlamaktadır. Fakat aylık bazdaki ani değişimlerin belirlenmesini etkilemiş olabilir. Ciddi kuraklık olaylarının görüldüğü dönemlerde TWS verisinde negatif değerler ve belirgin azalmalar görülmüştür. Benzer şekilde Okay Ahi ve Jin (2019), 2002-2016 yılları arasında ülkemizde ciddi kuraklıkların görüldüğü dönemleri TWS verilerindeki belirgin azalmalar ile ilişkilendirmiştir. Seyhan Havzası’nı kullanan Bektaşoğlu (2024) çalışmasında da 2007, 2008, 2014 ve 2020 yılları sonrasında TWS verilerinde en düşük değerler görülmüş olup bu çalışmaya benzer şekilde ülkede yaşanan kuraklık olayları ile doğru orantılı olduğu öngörülmüştür.

5. Sonuç

Su kaynaklarının yönetimi bakımından kuraklığın belirlenmesi ve etkilerinin azaltılması oldukça önemlidir. Artan kuraklık riski ile beraber bütüncül yaklaşımları içeren sürdürülebilir çözümlerin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ülkemizde kuraklık, ciddi çevresel sorunlardan biri olarak durmaktadır. Bölgesel ölçekte bakıldığında, Seyhan Havzası iklim değişikliği kaynaklı kuraklık olaylarından etkilenecek havzaların başında gelmektedir. Aynı zamanda sahip olduğu biyolojik çeşitlilik sebebiyle kuraklık konusunda bilim insanları tarafından oldukça ilgi çekmektedir. Bu çalışmada Seyhan Havzası’nda bulunan Adana ili için GRACE ve GRACE-FO uydu misyonlarından sağlanan TWS verileri ile kuraklık arasındaki ilişkinin incelenmesi amaçlanmıştır. TWS verilerinin zaman içerisinde azalan yönde eğilim gösterdiği görülmüştür. Bu durum kuraklığın bir işareti olarak yorumlanabilir. Diğer yandan 1964-2024 zaman aralığında aylık toplam yağış verilerinden hesaplanan SPI kuraklık indisi değerleri incelendiğinde, azalan yönde eğilim gösterdiği görülmüştür. 1964-2024 zaman aralığında elde edilen sonuçlara bakıldığında; aşırı kuraklık olayı görülmemiş olup şiddetli, orta ve hafif düzeyde kuraklıklar mevcuttur. Özellikle hidrolojik süreçlerin incelenmesinde TWS ve SPI arasındaki ilişki önemli sonuçlar vermektedir. Bu çalışma sonucunda; TWS yeraltı suyu, toprak nemi, yüzey suyu ve kar suyunu içermesine rağmen yağış parametresine dayalı SPI kuraklık indisi ile arasında büyük çoğunlukla güçlü korelasyonlar bulunmuştur. Ciddi kuraklık olaylarının görüldüğü yıllarda TWS ve SPI değişimleri büyük çoğunlukla uyumlu ilişki göstermiştir. SPI bir meteorolojik kuraklık indisi iken, TWS hidrolojik kuraklığı temsil etmektedir. SPI indisinin TWS verileri ile birlikte incelenmesi meteorolojik kuraklıktan sonra meydana gelen hidrolojik kuraklığın değerlendirilmesinde önemlidir. Bu sayede su döngüsü mekanizması daha iyi anlaşılabilir ve kuraklık tahmini sistemleri geliştirilebilir.

Bunun yanında GRACE misyonuna dayalı kuraklık indisleri kullanılarak daha kapsamlı değerlendirmelerin yapılması mümkündür. Devam eden iyileştirmelerle GRACE ve GRACE-FO uydu misyonlarının kuraklık araştırmaları için daha etkili hale geleceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Yazar, çalışmada kullanılan aylık toplam yağış verilerinin teminini sağlayan Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne, GRACE ve GRACE-FO TWS veri seti için NASA ve JPL'e teşekkür eder.

Kaynakça

- Aktürk, G., Zeybekoğlu, U., & Yıldız, O. (2022). Drought investigation using SPI and SPEI methods: a case study in Kırıkkale. *Ulusal Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 14(2), 762–776. <https://doi.org/10.29137/umagd.1100886>
- Al-Abadi, A. M., Hassan, A. A., Al-Moosawi, N. M., Handhal, A. M., Alzahrani, H., Jabbar, F. K., & Anderson, N. L. (2024). Drought susceptibility mapping in Iraq using GRACE/GRACE-FO, GLDAS, and machine learning algorithms. *Physics and Chemistry of the Earth*, 134, Article 103583. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103583>
- Bacanlı, Ü. G., & Akşan, G. N. (2019). Drought analysis in Mediterranean region. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 25(6), 665–671. <https://doi.org/10.5505/pajes.2019.64507>
- Baykal, T., Taylan, D., & Terzi, Ö. (2023). Isparta ili için gelecekteki olası meteorolojik kuraklık değerlendirmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 9(1), 90–100. <https://doi.org/10.21324/dacd.1165500>
- Bektaşoğlu, M. (2024). *Türkiye’de GRACE ve GRACE-FO uyduları ile yeraltı suyu değişimlerinin izlenmesi* [Yüksek Lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Cui, A., Li, J., Zhou, Q., Zhu, H., Liu, H., Yang, C., Wu, G., & Li, Q. (2024). Propagation dynamics from meteorological drought to GRACE-based hydrological drought and its influencing factors. *Remote Sensing*, 16(6), Article 976. <https://doi.org/10.3390/rs16060976>
- Çelik, M. Ö., & Yakar, M. (2024). Mersin’in farklı kuraklık indeksleri aracılığıyla kuraklık tehdidinin araştırılması. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 24(1), 71–84. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1331753>
- Dikici, M. (2019). Asi Havzası’nda (Türkiye) kuraklık analizi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 5(1), 22–40. <https://doi.org/10.21324/dacd.426784>
- Dikici, M. (2020). Drought analysis with different indices for the Asi Basin (Turkey). *Scientific Reports*, 10(1), Article 20739. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77827-z>
- Duan, A., Zhong, Y., Xu, G., Yang, K., Tian, B., Wu, Y., Bai, H., & Hu, E. (2024). Quantifying the 2022 extreme drought in the Yangtze River Basin using GRACE-FO. *Journal of Hydrology*, 630, Article 130680. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130680>
- Gu, L., Chen, J., Yin, J., Sullivan, S. C., Wang, H. M., Guo, S., Zhang, L., & Kim, J. S. (2020). Projected increases in magnitude and socioeconomic exposure of global droughts in 1.5 and 2 °C warmer climates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1), 451–472. <https://doi.org/10.5194/hess-24-451-2020>
- Gumus, V., & Algin, 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>
- Han, Z., Huang, S., Peng, J., Li, J., Leng, G., Huang, Q., Zhao, J., Yang, F., He, P., Meng, X., & Li, Z. (2023). GRACE-based dynamic assessment of hydrological drought trigger thresholds induced by meteorological drought and possible driving mechanisms. *Remote Sensing of Environment*, 298, Article 113831. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113831>
- Houborg, R., Rodell, M., Li, B., Reichle, R., & Zaitchik, B. F. (2012). Drought indicators based on model-assimilated Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) terrestrial water storage observations. *Water Resources Research*, 48(7), Article W07525. <https://doi.org/10.1029/2011WR011291>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2021: Impacts, adaptation and vulnerability. contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. In H. O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem & B. Rama (Eds.) (pp. 3056). Cambridge University Press.
- Karasu, İ. G. (2019). *Intercomparison of GRACE-based groundwater level change and in-situ measurements over central Anatolia Basins* [Yüksek Lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Lenk, O. (2013). Satellite based estimates of terrestrial water storage variations in Turkey. *Journal of Geodynamics*, 67, 106–110. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2012.04.010>
- Liu, Y., Min, R., Du, H., & Guo, W. (2024). Assessing the performance of GNSS-R observations in drought monitoring: a case study in Jiangxi and Hunan, China. *Geocarto International*, 39(1), Article 233351. <https://doi.org/10.1080/10106049.2024.233351>
- Long, D., Scanlon, B. R., Longuevergne, L., Sun, A. Y., Fernando, D. N., & Save, H. (2013). GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas. *Geophysical Research Letters*, 40(13), 3395–3401. <https://doi.org/10.1002/grl.50655>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January 17–22). *The relationship of drought frequency and duration to time scale* [Conference presentation]. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, California.
- Okay Ahi, G., & Cekim, H. O. (2021). Long-term temporal prediction of terrestrial water storage changes over global basins using GRACE and limited GRACE-FO data. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 56(2), 321–344. <https://doi.org/10.1007/s40328-021-00338-4>
- Okay Ahi, G. (2021). Evaluation of filtering effects on terrestrial water storage estimation from new GRACE releases. *Geocarto International*, 36(4), 449–464. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1611950>
- Okay Ahi, G., & Jin, S. (2019). Hydrologic mass changes and their implications in Mediterranean-climate Turkey from GRACE measurements. *Remote Sensing*, 11(2), Article 120. <https://doi.org/10.3390/rs11020120>
- Öztürk, E. Z. (2022). Evaluation of water storage changes in Southeastern Anatolia, Turkey, using GRACE and GLDAS. *Meteorology Hydrology and Water Management*, 10(1), 47–59. <https://doi.org/10.26491/mhwm/149849>
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought*. Office of Climatology, US Weather Bureau.

- Ramillien, G., Famiglietti, J. S., & Wahr, J. (2008). Detection of continental hydrology and glaciology signals from GRACE: a review. *Surveys in Geophysics*, 29(4-5), 361–374. <https://doi.org/10.1007/s10712-008-9048-9>
- Tarım ve Orman Bakanlığı. (2022). *Türkiye tarımsal kuraklıkla mücadele stratejisi ve eylem planı (2023-2027)*. Tarım ve Orman Bakanlığı. <https://www.tarimorman.gov.tr/TRGM/Belgeler/0TARIMSAL%20%C3%87EVRE%20VE%20DO%20%C4%9EAL%20KAYNAKLARI%20KORUMA%20DA%20%C4%B0RE%20BA%20%C5%9EKANLI%20%C4%9EYay%20%C4%B1nlar%20%C4%B1m%20%C4%B1z%20Tar%20%C4%B1msal%20Kuraklı%20%C4%B1kla%20Mu%20CC%88cadele.pdf>
- T.C. Resmî Gazete. (2022). *Tarımsal Kuraklık Yönetiminin Görevleri, Çalışma Usul ve Esaslarına Dair Yönetmelik* (Resmî Gazete Tarih: 23 Temmuz 2022, Sayı: 31901). <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2022/07/20220723-10.htm>
- Topçu, E., & Seçkin, N. (2016). Drought analysis of the Seyhan Basin by using standardized precipitation index (SPI) and l-moments. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 22(2), 196–215. https://doi.org/10.1501/Tarimbil_0000001381
- Tramblay, Y., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S. M., Volaire, F., Boone, A., Page, M. Le, Llasat, M. C., Albergel, C., Burak, S., Cailleret, M., Kalin, K. C., Davi, H., Dupuy, J.-L., Greve, P., Grillakis, M., Hanich, L., Jarlan, L., Martin-StPaul, N., ... & Polcher, J. (2020). Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. *Earth-Science Reviews*, 210, Article 103348. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103348>
- Vishwakarma, B. D. (2020). Monitoring droughts from GRACE. *Frontiers in Environmental Science*, 8, Article 584690. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.584690>
- Wiese, D. N., Yuan, D. N., Boening, C., Landerer, F. W., & Watkins, M. M. (2023). *JPL GRACE and GRACE-FO Mascon Ocean, Ice, and Hydrology Equivalent Water Height CRI Filtered RL06.3Mv04. Ver. RL06.3Mv04* [Data set]. PO.DAAC. <https://doi.org/10.5067/TEMSC-3MJ634>
- Wilhite, D. A. & Glantz, M. H. (1985). Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water International*, 10(3), 111–120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>
- Zeybekoglu, U. (2025). Comparative drought analysis in Amasya and Merzifon with ZSI, PNI and NDI under transitional climatic conditions. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 110, Article 101556. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2025.101556>
- Zhang, Y., He, B., Guo, L., & Liu, D. (2019). Differences in response of terrestrial water storage components to precipitation over 168 global river basins. *Journal of Hydrometeorology*, 20(9), 1981–1999. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0253.1>