

ÇOK ZAMANLI SENTINEL-2 GÖRÜNTÜLERİ KULLANILARAK SAKARYA NEHRİ SU KALİTESİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN GOOGLE EARTH ENGINE PLATFORMUNDA İZLENMESİ

Rümeysa KARATAŞ¹, Damla KOPUZ², Osman Yavuz ALTUNTAŞ³, İsmail ÇÖLKESEN⁴

¹Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, r.karatas2019@gtu.edu.tr

²Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, d.kopuz2020@gtu.edu.tr

³Arş. Gör., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, oyavuzaltuntas@gtu.edu.tr

⁴Doç. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli, icolkesen@gtu.edu.tr

ÖZET

Nehirler dünya tatlı su ekosisteminin önemli bileşenlerindedir. Tüm tatlı su kaynaklarında olduğu gibi nehirler son yıllarda temel olarak yaşanan iklim değişiklikleri, insan kaynaklı faaliyetler ve tarımsal aktiviteler nedeniyle yoğun baskı altındadır. Bu baskı neticesinde su kalitesinde önemli derecede değişimler ortaya çıkabilmektedir. Uzaktan algılama teknolojileri su kaynaklarının izlenmesi ve zaman içerisinde meydana gelen değişimlerin tespitinde sağladığı avantajlar ile önemli bir veri kaynağı durumundadır. Bu çalışmada çok zamanlı Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılarak Google Earth Engine platformu aracılığıyla Türkiye'nin en uzun üçüncü nehri olan Sakarya Nehri üzerinde su kalitesinde meydana gelen değişimlerin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Yenice Barajı'ndan başlayıp Karadeniz'de son bulan yaklaşık 305 km'lik nehir çalışma alanı olarak seçilmiştir. Sakarya Nehri'nin belirlenen hattı boyunca değişim analizi için 1.428 nokta seçilmiştir. Çalışma alanını kapsayan 2023 yılı Haziran, Temmuz ve Ağustos aylarında elde edilen Sentinel-2 (Level-2A) görüntüleri birincil veri seti olarak alınmış ve Sakarya Nehri'nin su kalitesi Normalize Fark Sucul Bitki Örtüsü İndeksi (NDAVI) ve Normalize Fark Klorofil İndeksi (NDCI) kullanılarak mekansal-zamansal olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, hesaplanan indeks değerleri ve su kalitesi ilişkisi, mevcut klorofil-a (Chl-a) ve toplam askıda madde (TSM) verileri kullanılarak analiz edilmiştir. Zaman serisi analizi, NDAVI değerlerinin nehrin incelenen bölümü boyunca genellikle 0'ın altında olduğunu ve en düşük NDAVI değerlerinin nehrin tarım ve yerleşim alanlarının yoğun olduğu 100-200 km'lik bölümünde gözlemlendiğini göstermiştir (Şekil 5). Ayrıca NDAVI değerleri tarımsal faaliyetlerin en yoğun olduğu Ağustos ayında, özellikle nehrin Karadeniz'e döküldüğü kısımlarda daha düşüktür. İndeksler ile su kalitesi parametreleri arasındaki ilişki incelendiğinde NDAVI indeksi ile Chl-a ve TSM değerleri arasında güçlü bir ters ilişki olduğu tespit edilmiş, düşük NDAVI değerleri için su kalitesi parametre değerlerinin yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 8a). Çalışma sonuçları, Sentinel-2 görüntülerinden GEE platformu üzerinde oluşturulan NDAVI haritalarının nehir ve göl gibi sucul kaynaklarda su kalitesinin zamansal olarak izlenmesi için alternatif ve değerli bir veri seti olduğunu göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: Su kalitesi, Su indeksleri, Sentinel-2, Google Earth Engine, Klorofil-a

ABSTRACT

MONITORING CHANGES IN SAKARYA RIVER WATER QUALITY USING MULTI-TIME SENTINEL-2 IMAGERY ON GOOGLE EARTH ENGINE PLATFORM

Rivers are essential components of the world's freshwater ecosystem. As with all freshwater resources, rivers have been under intense pressure in recent years, mainly due to climate change and anthropogenic and agricultural activities. As a result of this pressure, significant changes in water quality can occur. Remote sensing technologies are a crucial data source due to their advantages in monitoring water resources and detecting changes over time. This study aimed to determine the changes in water quality in Sakarya River, Turkey's third longest river, using multi-temporal Sentinel-2 satellite imagery via the Google Earth Engine (GEE) platform. For this purpose, the study area was selected for approximately 305 km of the river, starting from Yenice Dam and ending at the Black Sea. Along the determined line of the Sakarya River, 1428 points were selected for change analysis. Sentinel-2 (Level-2A) images acquired in June, July, and August of 2023 covering the study area were taken as the primary dataset, and the water quality of the Sakarya River was analyzed spatiotemporally using Normalized Difference Aquatic Vegetation Index (NDAVI) and Normalized Difference Chlorophyll Index (NDCI). Furthermore, the calculated index values and water quality relationship were analyzed using available chlorophyll-a (Chl-a) and total suspended matter (TSM) data. The times series analysis indicated that NDAVI values are generally below 0 along the studied section of the river, with the lowest NDAVI values observed in the 100-200 km part of the river where agricultural and residential areas are dense (Figure 5). In addition, NDAVI values are lower in August when agricultural activities are most intense, especially in the parts where the river flows into the Black Sea. When the relationship between the indices and water quality parameters was analyzed, it was found that there was a strong inverse relationship between the NDAVI index and Chl-a and TSM values, and it was observed that water quality parameter values were high for low NDAVI values (Figure 8a). Results of the study showed that the NDAVI maps created from Sentinel-2 images on the GEE platform are an alternative and valuable dataset for temporal monitoring of water quality in aquatic resources such as rivers and lakes.

Keywords: Water quality, Water indices, Sentinel-2, Google Earth Engine, Chlorophyll-a

1. GİRİŞ

Su kaynakları, ekosistemlerin devamlılığı ve insan yaşamı için kritik öneme sahiptir. Tatlı su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi, iklim değişikliği, nüfus artışı ve insan faaliyetleri nedeniyle giderek daha fazla önem kazanmaktadır (Akın, vd., 2007). Türkiye'deki göller ve sulak alanlar hem biyolojik çeşitliliğin korunması hem de ekonomik ve sosyal faydalar açısından büyük bir öneme sahiptir. Ancak, bu su ekosistemleri, kirlilik, su çıkarma ve iklim değişikliği gibi çeşitli tehditlerle karşı karşıyadır. Tomar (2009), bu kirlilik artışının, sürdürülebilir su kaynakları yönetimi açısından önemli sonuçlar doğurduğunu vurgularken, kirliliğin özellikle sucul ekosistemler ve halk sağlığı üzerindeki etkilerini incelerken, önlemler alınması gerektiğini ifade etmektedir.

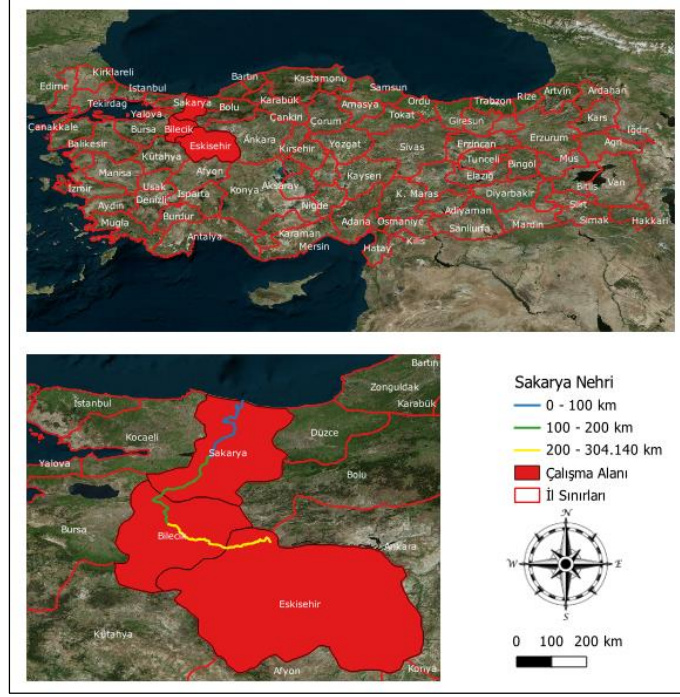
Uzaktan algılama teknolojileri sağladığı önemi avantajlar sayesinde su kaynaklarının izlenmesi ve bu sınırlı doğal kaynaklarda meydana gelen değişimlerin tespit edilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Literatürde, uzaktan algılanmış görüntüler kullanılarak su kalitesinin izlenmesine yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Akbar, vd., (2010), Landsat ve MODIS uydu verileri kullanarak su kalitesi parametrelerinin (klorofil-a, TSS, bulanıklık) tahmini için bir uzaktan algılama tabanlı çerçeve geliştirmiştir. Topp vd., (2020), iç su kalitesi bilimi alanında uzaktan algılamanın araştırma trendlerini incelemiş ve multidisipliner uygulamalara geçişin önemini vurgulamıştır. Zhao vd., (2020) ise Sentinel-2 verileri kullanarak su kalitesi parametrelerinin izlenmesine yönelik algoritmaların etkinliğini değerlendirmiştir. Örmeci vd., (2005), Tuz Gölü'ndeki su kalitesi değişimlerini uzaktan algılama teknikleri kullanarak analiz etmiştir. Landsat uydu görüntüleri ile gölün su kalitesindeki zamansal değişiklikler değerlendirilmiş ve bu değişikliklerin çevresel faktörlerle olan ilişkisi incelenmiştir. Sonuçlar, uzaktan algılama verilerinin su kalitesi izleme çalışmalarında etkili olduğunu göstermektedir. Colkesen vd. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada mısır bitkisi fenolojik gelişim süresince Sakarya Nehri'nden toplanan numunelere ilişkin su kalite parametreleri analiz edilmiş ve Sentinel-2 görüntüleri ile ilişkilendirilmiştir. Çalışma sonuçları, mısır bitkisi gelişim süresince su kalitesi parametrelerinde önemli değişimler olduğunu ve Sentinel-2 yardımıyla hesaplanan spektral indekslerin su kalitesi parametreleri ile yüksek korelasyona sahip olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin en uzun üçüncü nehri olan Sakarya Nehri'ndeki su kalitesi değişikliklerinin izlenmesinde multi-temporal Sentinel-2 görüntüleri ve spektral su indekslerinin potansiyel kullanımını araştırmaktır. Bu amaç doğrultusunda, nehrin Sakarya, Bilecik ve Eskişehir il sınırları içerisinde kalan yaklaşık 305 km'lik kısmı değerlendirmeye alınmıştır. Google Earth Engine (GEE) bulut platformu aracılığıyla 2023 yılı Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında kaydedilen Sentinel-2 görüntüleri üzerinden hesaplanan normalize fark klorofil indeksi (NDCI) ve normalize fark sucul bitki örtüsü indeksi (NDAVI) verileri ile zaman serisi analizleri gerçekleştirilerek su kalitesindeki değişimler zamansal ve mekânsal olarak incelenmiştir.

1.1 Çalışma Alanı ve Veri Seti

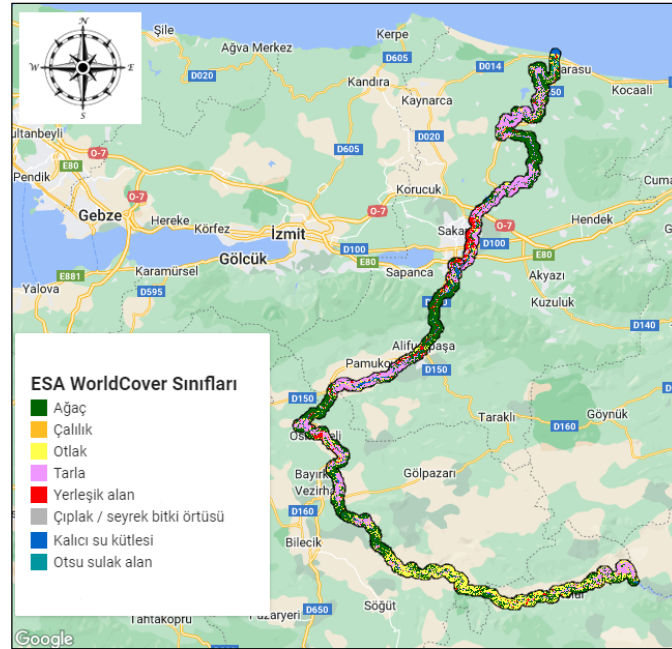
Sakarya Nehri, Türkiye'nin en önemli akarsularından biri olup, Karadeniz'e dökülmektedir. Çalışma alanı, Sakarya Nehri'nin Karadeniz'e döküldüğü noktadan başlayarak, nehrin 304,140 kilometrelik üst, orta ve alt kesimlerini kapsamaktadır (Şekil 1). Bu bölge, hidrografik, ekolojik ve jeomorfolojik özellikleri ile dikkat çekmektedir. Hidrografik açıdan, nehir, farklı debi ve akış rejimlerine sahip olup, su kalitesi, sediment taşınımı ve su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi açısından önem taşımaktadır (Özcan, 2008). Arazileri ve sanayi tesisleri için hayati öneme sahip olan bu alan, aynı zamanda yoğun tarımsal faaliyetler, sanayi atıkları ve kentsel yerleşimlerden kaynaklanan kirlilik sorunlarıyla karşı karşıyadır. Ekolojik olarak, Sakarya Nehri'nin bu bölgesi zengin biyolojik çeşitliliğe ev sahipliği yapmakta olup, sucul bitkiler, balık türleri ve kuş göç yolları ile önemli bir yaşam alanıdır. Jeomorfolojik olarak ise nehir yatağı, yerel jeolojik yapılar ve sediment taşınım süreçleri tarafından şekillenmekte, deltalaşma süreçleri gözlemlenmektedir (Özer vd., 2019). Bu süreçler, bölgedeki taşkın riski yönetimi ve arazi kullanımı planlaması üzerinde doğrudan etkilidir.

Bu çalışmada, Sakarya Nehri'nin su kalitesi ve çevresel değişikliklerini izlemek amacıyla Sentinel-2 uydu görüntüleri ve Avrupa Uzay Ajansı (ESA) WorldCover 10m v200 veri seti kullanılmıştır. Sentinel-2, ESA tarafından Copernicus programı kapsamında geliştirilen bir uydu misyonu olup ve yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlüklü optik görüntüleri sağlamaktadır. Sentinel-2 uydu görüntüleri, 10 metre konumsal çözünürlüğe sahip dört adet spektral bant, 20 metre konumsal çözünürlüğe sahip altı adet spektral bant ve 60 metre konumsal çözünürlüğe sahip üç adet spektral banda sahiptir. Görüntüler, 5 günlük aralıklarla toplanmakta olup, bitki örtüsü, su kütleleri ve kentsel alanların detaylı analizine olanak tanımaktadır. Sakarya Nehri üzerindeki kirlilik analizlerinde Sentinel-2 verileri kullanılarak, nehirdeki su kalitesi ve çevresel değişiklikler detaylı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 1: Sakarya Nehri Çalışma Alanı

ESA WorldCover 10m v200 veri seti, 10 metre konumsal çözünürlükte dünya çapında arazi örtüsü sınıflandırması sunmaktadır. Bu veri seti, Sakarya Nehri'nin çevresindeki arazi kullanımı ve örtüsünü analiz etmek ve arazi kullanımındaki değişikliklerin su kalitesi üzerindeki etkilerini anlayabilmek amacıyla kullanılmıştır. Arazi örtüsünü temsil eden ESA WorldCover sınıfları Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2: ESA WorldCover Sakarya Nehri Arazi Örtüsü

Ayrıca bu çalışmada, zaman serisi analizleri ile Sakarya Nehri'nin su kalitesinde tespit edilen değişimlerin karşılaştırmalı olarak analiz edilmesi amacıyla Sentinel-2 uydu görüntülerinden elde edilen klorofil-a (Chl-a) ve toplam askıda madde (TSM) verilerinden de yararlanılmıştır. Bu amaçla, Sentinel-2 uydu verileri, SNAP yazılımında (Case-2 Regional Coast Colour) atmosferik düzeltme modülü yardımıyla ön işleme tabi tutulmuştur. Bu modül, su yüzeyinden yansıyan spektral verileri kullanarak Chl-a ve TSM değerlerini tahmin edebilmektedir. C2RCC algoritması, su piksellerinin yansımalarını analiz ederek ve dünyanın farklı alanlarındaki veriler ile eğitilen yapay sinir

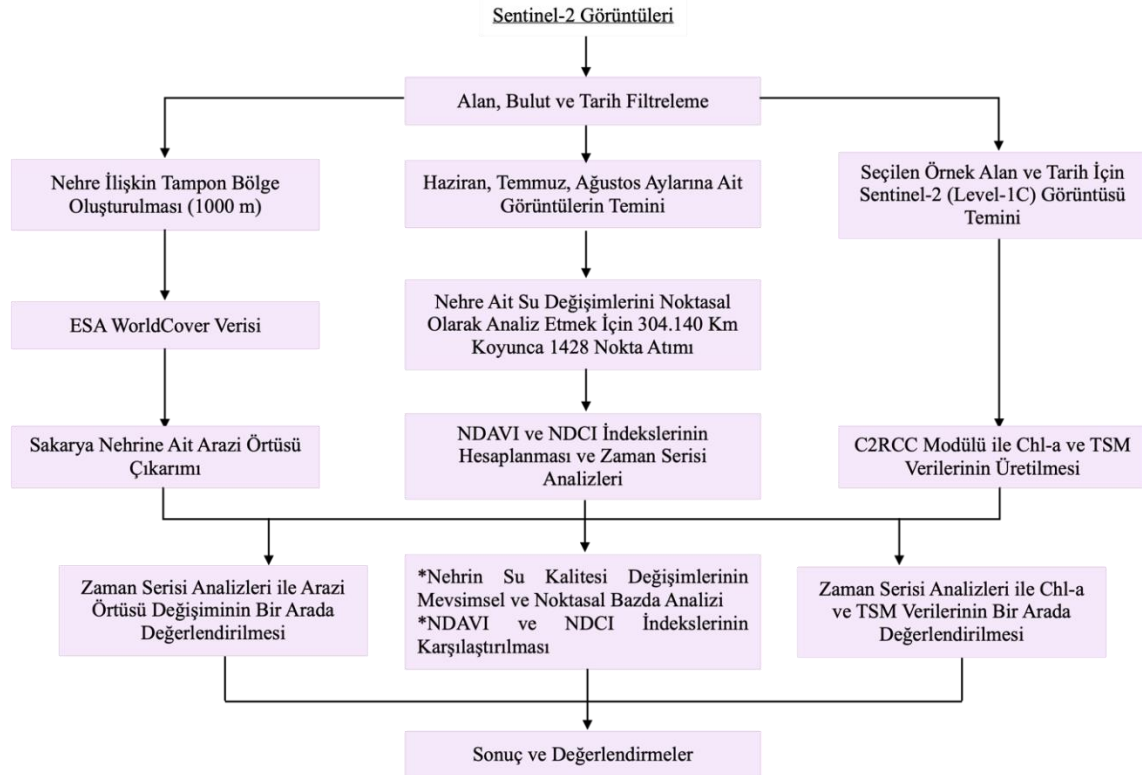
ağları yardımıyla su kalitesine ilişkin tahminler yapılabilmektedir. Elde edilen Chl-a ve TSM verileri, nehirdeki su kalitesi parametrelerinin mekansal dağılımını ve konsantrasyonunu temsil etmektedir. İç ve kıyı bölgelerde su kalitesini iyileştirmek amacıyla C2RCC algoritmasının kombinasyonunu araştırmışlardır. Çalışmaları, klorofil-a ve toplam askıda katı madde gibi su kalitesi parametrelerinin daha doğru bir şekilde belirlenmesinde bu kombinasyonların potansiyelini vurgulamaktadır (Soriano-González, vd., 2022).

1.2 Google Earth Engine Bulut Platformu

Google Earth Engine (GEE), coğrafi bilgi sistemleri ve uzaktan algılama alanlarında önde gelen, büyük boyutlu coğrafi veri kümelerinin depolanması, işlenmesi, analiz edilmesi ve görselleştirilmesi için tasarlanmış, bulut tabanlı bir platformdur. Kullanıcıların büyük ölçekli coğrafi veri kümeleri üzerinde hızlı ve etkili analizler yapmalarına olanak tanımaktadır. GEE platformu uydu görüntüleri, meteorolojik veriler ve diğer kaynaklar aracılığı ile elde edilen çeşitli coğrafi veri setlerine ulaşım imkanı sağlayarak araştırmacıların analizlerinde kullanabilmeleri için geniş bir veri tabanı erişimi sağlar. Platform, paralel ve dağıtık hesaplama teknolojilerini kullanarak büyük ölçekli veri işleme işlemlerini optimize ederek kullanıcıların zaman serileri analizi, görüntü sınıflandırma gibi karmaşık analizleri gerçekleştirmelerine yardımcı olur. Bunun yanında, kullanıcıların Python, JavaScript ve diğer programlama dillerini kullanarak GEE API'sini yardımıyla araştırmacıların ve geliştiricilerin platforma kolayca erişmelerini ve özelleştirilmiş analizler oluşturmalarına olanak sağlar. Bulut platformun en önemli avantajları, kullanıcıların verileri hızlı bir şekilde işlemesine olanak tanıyarak veri filtreleme, yeniden boyutlandırma, birleştirme, dönüştürme ve yeniden örnekleme işlemlerini yapabilmeleridir.

2. UYGULAMA

Çalışmanın temel amacı Sakarya Nehri su kalitesinde meydana gelen zamansal değişimlerin analiz edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda gerçekleştirilen temel işlem adımları Şekil 3'de akış şeması üzerinde verilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalar, (1) GEE platformu aracılığıyla alan, bulut ve tarih filtreleri kullanılarak mevcut Sentinel-2 görüntülerinin temini, (2) su kalitesi değişimlerinin zamansal ve mekansal analizi amacıyla nehir hattı boyunca örnekleme noktalarının belirlenmesi, (3) örnek noktalar esas alınarak NDAVI ve NDCI indeksleri yardımıyla zaman serisi analizlerinin gerçekleştirilmesi, (4) nehrin 1000 m tampon bölgesi içerisindeki arazi örtüsü kullanımının ESA WorldCover verisi üzerinden temini ve zaman serisi analizleri ile birlikte değerlendirilmesi ve (5) Chl-a ve TSM verilerinin üretilerek zaman serisi analizleri ile karşılaştırılmasını içermektedir.



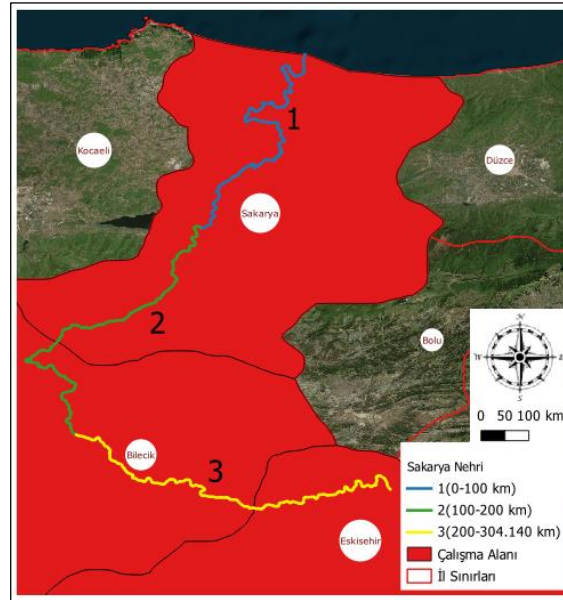
Şekil 3: Çalışmada takip edilen işlem adımları

GEE platformu kullanılarak Sentinel-2 uydu görüntülerine öncelikle %60 sınırlı bulutluluk filtresi uygulanmıştır. Sakarya Nehri üzerinde, Karasu'da denize döküldüğü alandan Yenice Barajı başlangıcına kadar olan bölge seçilerek alan filtresi işlemi yapılmıştır. Mayıs, Haziran, Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarına ait görüntüler için zaman filtresi kullanılmıştır. Bu ön işlemler sonucu elde edilen görüntülerin hepsi nehir boyunca üzerinde bulut veya bulut gölgesi gelme ihtimali ile dikkatle incelenerek sonuçta analizlere esas olacak "22-24 Haziran 2023", "03-05 Temmuz 2023", "13-15 Temmuz 2023", "22-24 Ağustos 2023" ve "27-29 Ağustos 2023" tarihli görüntüler seçilmiştir. Su kalitesi analizleri için kullanılan Normalize Fark Klorofil İndeksi (NDCI) su kütlelerindeki fitoplankton biyokütlesini ve klorofil-a konsantrasyonlarını belirlemek için kullanılır. Bu spektral indeks, özellikle alg çoğalmalarının izlenmesi ve suyun biyolojik sağlığının değerlendirilmesi açısından önemlidir. Kullanılan bir diğer spektral indeks sucul bitki örtüsünün tespiti ve izlenmesi için geliştirilen Normalize Fark Sucul Bitki Örtüsü İndeksi (NDAVI). Bu indeks, sucul ekosistemlerdeki bitki yoğunluğunu ve biyokütleyi belirlemek için kullanılmaktadır. Çizelge 1'de çalışmada kullanılan indekslerin temel eşitlikleri ve referans kaynakları verilmiştir.

Çizelge 1: Spektral İndeksler ve temel eşitlikleri

NDCI	$\frac{Bant\ 4 - Bant\ 5}{Bant\ 4 + Bant\ 5}$	Mishra, S., & Mishra, D. R. (2012)
NDAVI	$\frac{Bant\ 8 - Bant\ 2}{Bant\ 8 + Bant\ 2}$	Tucker, C. J. (1979)

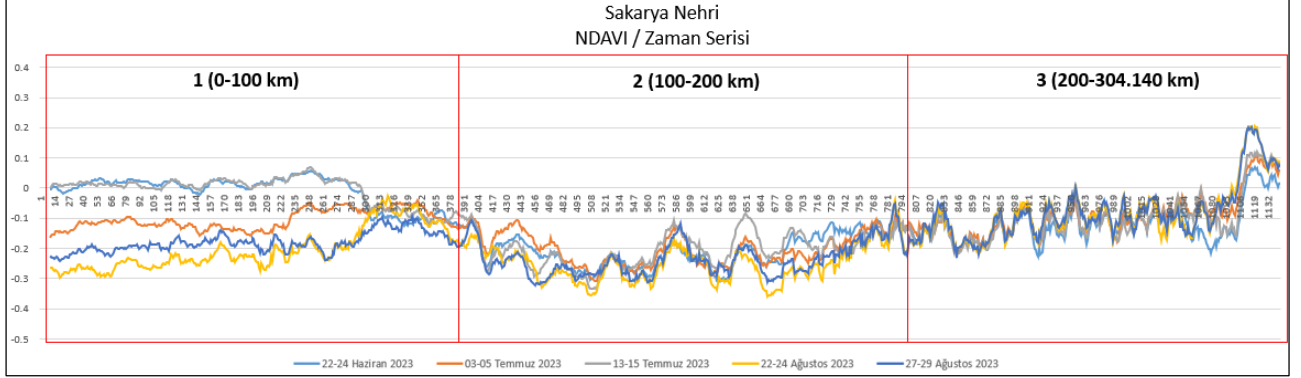
Çalışma alanının uzunluğu 304,140 km olup, Sakarya Nehri'nin akış hızının, nehir yatağının genişliğinin ve su debisinin değiştiği farklı kısımlardan oluşmaktadır. Bu etmenler nehir üzerinden seçilen noktaların bir kısmında mevsimsel değişimlere bağlı olarak gürültü (noise) etkisi oluşturabilmektedir. Bu nedenle zaman serisi analizlerinde gürültü etkisi oluşan noktalar tespit edilerek analizlerden çıkarılmıştır. Analizlerin kolaylaştırılması amacıyla nehir uzunluğu üç parçaya ayrılarak ele alınmıştır (Şekil 4). Sakarya Nehri'nin Karasu'ya döküldüğü noktadan itibaren ilk 100 kilometrelik bölge 1. kısım olarak adlandırılmıştır. Bu noktanın ardından 100 ile 200'üncü kilometre arasındaki alan 2. kısım olarak tanımlanmıştır. İkinci kısmın sonu ile 304,140 km bulunan Yenice Barajı'nın başlangıcına denk gelen bölge 3. kısım olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4: Sakarya Nehri'nin Analiz Kolaylığı İçin Ayrılan Üç Parçanın Konumları

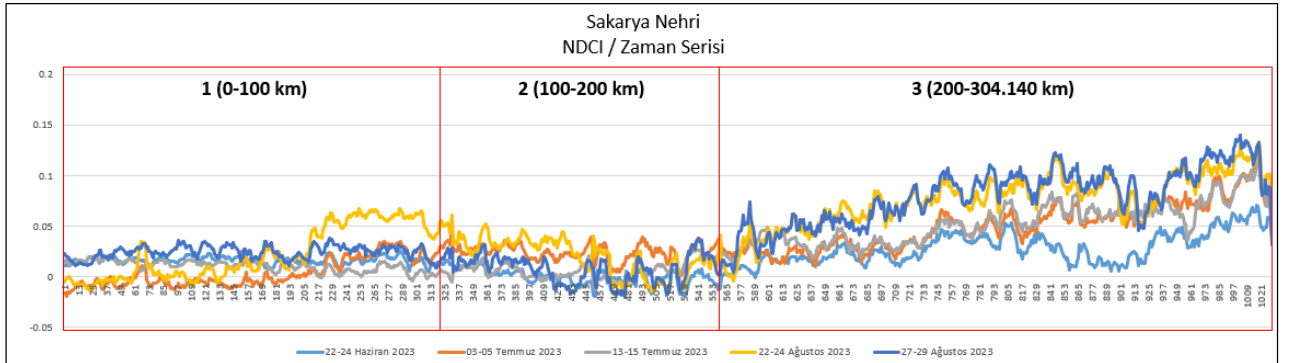
Zaman serileri oluşturmak için Karasu'dan başlayarak Yenice Barajına kadar nehir boyunca örnek noktalar atılmıştır. Bu noktalar ile NDAVI ve NDCI indeksleri ilişkilendirilmiştir ve nokta bazında indeks değerleri bulunmuştur. Nokta bazlı indeks değerleri ".csv" formatı şeklinde indirilmiştir ve yapılan ilk analizlerde görülen gürültü içeren noktaları elemek için üç parçaya ayrılmış kısımların kendi içlerinde ortalama eğri geçirilmiştir. Ortalama eğri geçirilerek elde edilen düzenlenmiş değerler ile zaman serisi grafikleri oluşturulmuştur. Bu sayede verilerin daha anlamlı hale gelmesi ve yorumlanmasının kolaylaştırılması sağlanmıştır. Şekil 5'te gürültü içeren noktaların filtrelenmesi neticesinde elde edilen NDAVI indeksine ilişkin zaman serisi grafiği görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere nehrin değerlendirmeye alınan 1. kısmında indeks değerleri aylık bazda birbirlerinden farklılık gösterirken, 2. ve 3.

kısımlarında birbirine yakın seyretmiştir. Çalışma alanının 2. kısmı olarak tanımlanan bölgesinde NDAVI değerlerinin en düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Literatürde NDAVI değerlerinin su kalitesi parametreleri ile ters korelasyonlu bir ilişkiye sahip olduğu belirtilmektedir (Colkesen vd., 2024). Dolayısıyla, çalışma alanının bu kısmında su kalitesi değerlerinin düşük olduğu şeklinde yorumlanabilmektedir. Çalışma alanının 1. kısmında özellikle Haziran ve Temmuz ayları içerisinde en yüksek NDAVI değerleri hesaplanmıştır ve kısımlarda nispeten su kalitesinin diğer kısımlara göre daha iyi olduğu ifade edilebilir.



Şekil 5: NDAVI indeksi ile elde edilen zaman serisi grafikleri.

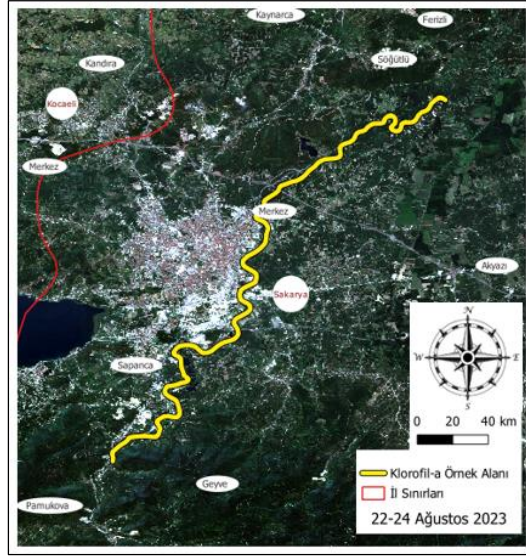
NDCI indeksi kullanılarak elde edilen zaman serisi grafiği Şekil 6'da verilmiştir. Grafik incelendiğinde nehrin 3. kısmında indeks değerlerinin diğer kısımlara göre özellikle ağustos aylarında daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. Bu kısımda temmuz ayları için hesaplanan indeks değerlerinin, ağustos ayı değerlerinden düşük ancak haziran ayı değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Nehrin 2. kısmında NDAVI zaman serisine benzer şekilde NDCI değerlerinin düşük seviyelerde seyrettiği görülmektedir. Ancak NDCI zaman serisi grafiği 1. ve 2. kısımlarda belirgin farklılıklar ortaya koymamaktadır.



Şekil 6: NDCI indeksi ile elde edilen zaman serisi grafikleri.

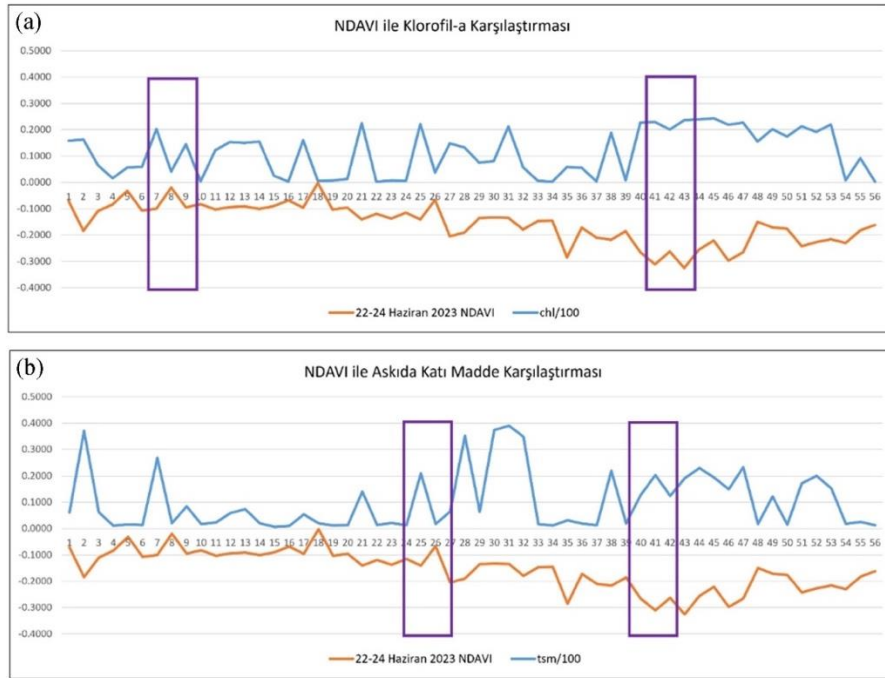
Zaman serisi analizleri ile elde edilen sonuçların geçerliliğinin değerlendirilmesi amacıyla Şekil 7'de gösterildiği üzere Sakarya Nehri üzerinde 46 km uzunluğunda bir test alanı belirlenmiştir. Bu alanı kapsayan ve zaman serisi analizlerinde de kullanılan 22-24 Haziran 2023 tarihinde kaydedilen Sentinel-2 (Level 1C) görüntüleri temin edilmiştir. Elde edilen görüntüler SNAP yazılımında C2RCC modülü yardımıyla işlenmiş ve eğitilmiş yapay sinir

ağları yardımıyla nehre ilişkin Chl-a (mg/m^3) ve TSM (g/m^3) su kalitesi parametrelerini temsil eden veri setleri üretilmiştir.



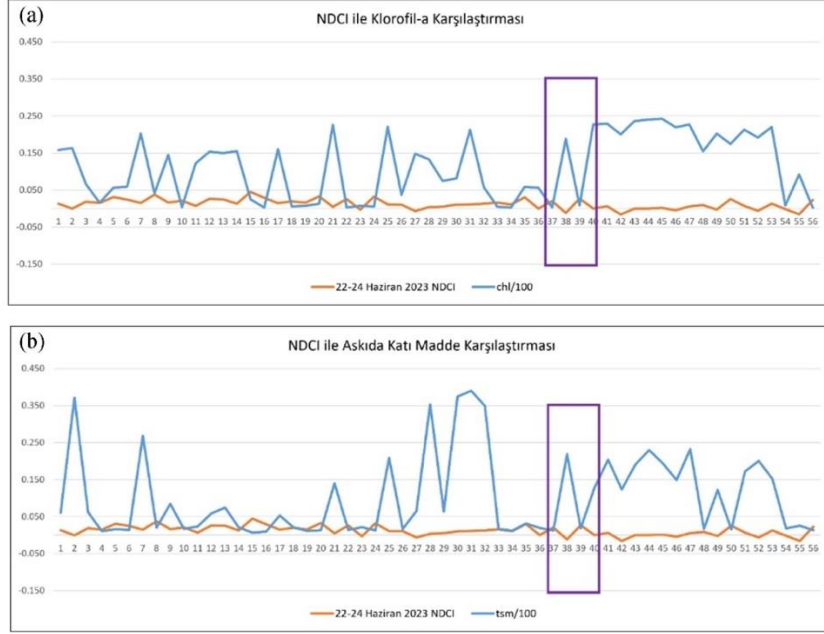
Şekil 7: İndeks değerleri ile Chl-a ve TSM değerleri karşılaştırılmasında kullanılan örnek alan.

Üretilen Chl-a ve TSM veri setleri zaman serisi analizinde kullanılan noktalar ile ilişkilendirilerek NDAVI ve NDCI değerleri ile olan ilişkileri ele alınmıştır. Şekil 8'de 40 km'lik örnek hat boyunca hesaplanan NDAVI indeks değerleri ile aynı noktalar için Chl-a ve TSM verilerinin yer aldığı mekânsal değişim grafiği gösterilmektedir. Şekil 8a'dan da görüleceği üzere NDAVI indeks değerleri ile Chl-a değerleri arasında ters bir ilişki mevcuttur. Nitekim Chl-a değerlerinin arttığı noktalarda NDAVI değerleri düşük değerler alırken, tersi durumlarda yani nehirde Chl-a değerlerinin düşük olduğu noktalarda NDAVI değerleri yüksek değerler almaktadır. Benzer şekilde noktasal bazlı analizler TSM değerleri ile NDAVI değerleri arasındaki bu ters korelasyonun varlığını göstermektedir. Dolayısıyla elde edilen bu sonuç literatürde elde edilen sonuçlara paralellik göstermekte ve zaman serisi analizlerinde elde edilen bulguları doğrular niteliktedir. Dolayısıyla NDAVI indeksi ile gerçekleştirilen analizler neticesinde, yüksek indeks değerlerinin hesaplandığı noktalarda su kalitesi parametrelerinin (örneğin Chl-a ve TSM) göreceli olarak düşük seviyelerde olduğu, düşük indeks değerleri hesaplanan noktalarda ise daha yüksek seviyelerde olduğu ifade edilebilir.



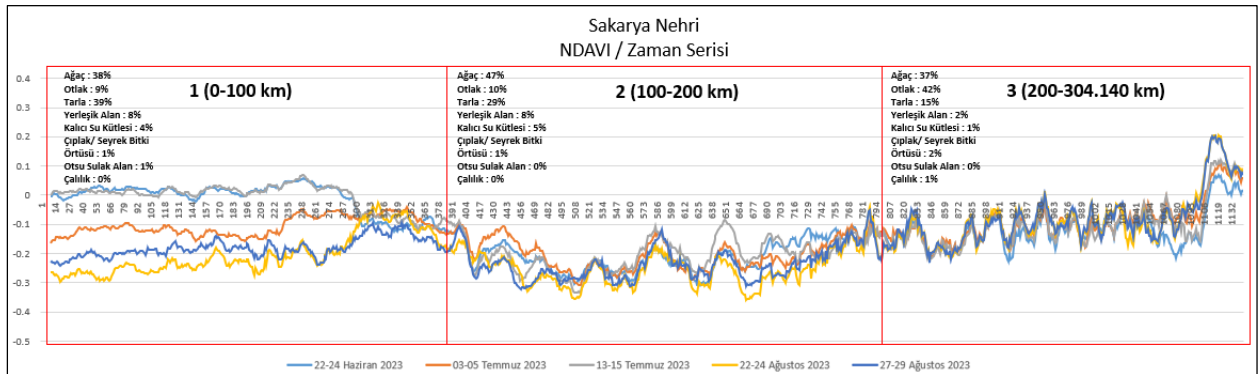
Şekil 8: NDAVI indeks değerleri ile (a) Chl-a ve (b) TSM değerlerinin karşılaştırması.

Benzer değerlendirmeler NDCI indeksi ile elde edilen indeks değerleri esas alınarak ele alındığında Şekil 9'dan da görüleceği üzere hem Chl-a hem de TSM parametreleri ile NDCI değerleri arasındaki korelasyonun daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Nitekim bazı noktalarda NDCI ve su kalitesi parametre değerleri aynı anda artarken/azalırken, bazı noktalarda NDCI değerlerinin değişmediği görülmektedir. Dolayısıyla NDCI indeksi ile hesaplanan zaman serisi grafiklerinin su kalitesi parametrelerindeki değişimin analiz edilmesinde kullanımının ve yorumlanmasının zor olduğu düşünülmektedir.



Şekil 9: NDCI indeks değerleri ile (a) Chl-a ve (b) TSM değerlerinin karşılaştırması

Sakarya Nehri'nin su kalitesini etkileyebilecek birçok faktör bulunmaktadır. Bunlar arasında arazi örtüsü ve arazi kullanımının önemli bir yeri vardır. Çalışma kapsamında Sakarya Nehri komşuluğundaki mevcut arazi örtüsü durumu ile zaman serisi analizi ile elde edilen noktasal bazlı değişimlerin bir arada ele alınması öngörülmüştür. Bu amaçla, nehrin 0-100 km, 100-200 km, 200-304.104 km²'lik kesimlerini içerisine alan üç kısım için ayrı ayrı arazi örtüsü tipleri ele alınmıştır. Her üç kısma ait nehir orta çizgisi vektörü GEE platformunun içine eklenmiştir. Nehir çevresindeki arazi örtüsü sınıflarını ele alabilmek için GEE platformunda “buffer()” fonksiyonu ile 1000 m tampon alan oluşturulmuştur. ESA'ya ait arazi örtüsü verisine yeniden projeksiyon yapılarak oluşturulan tampon bölgelerle ilişkilendirilmiştir. Değerlendirmeye alınan 3 kısım için oluşturulan 8 farklı arazi örtüsü sınıfı ile her bir sınıfın tampon bölge içerisinde kapsadığı alan yüzdesel olarak hesaplanmış ve Şekil 10'da NDAVI zaman grafiği üzerinde gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde her üç kısımda da arazi örtüsünün %85'den fazlasının ağaç, otlak ve tarla sınıfından oluştuğu görülmektedir. Diğer taraftan yerleşik alanlar 1. ve 2. kısımda %8'lik bir alan kaplarken, 3. kısımda %2'lik bir ağırlığa sahiptir. Nehrin su kalitesinin göreceli olarak düşük olduğu 2. kısımda 1000m'lik tampon bölge içerisinde tarla ve yerleşim olarak etiketlenen arazi örtüsü sınıfları %37'lik bir alanı kapsamaktadır. Bu kısımda ağaç ve otlak olarak etiketlenen alanlar ise %57'lik bir ağırlığa sahiptir.



Şekil 10: NDAVI ile Arazi Örtüsünün İlişkilendirilmiş Grafiği

3. SONUÇ VE ÖNERİLER

Uzaktan algılama teknolojileri, hızla gelişen teknolojiye paralel olarak büyük ilerlemeler kaydetmektedir. Bu teknolojiler, yeryüzü hakkında detaylı bilgi edinmeyi ve çeşitli çevresel faktörleri izlemeyi mümkün kılmaktadır. Çalışma kapsamında Sakarya Nehri özelinde Sentinel-2 uydu görüntüleri ve su indeksleri (NDAVI ve NDCI) yardımıyla su kalitesindeki değişimler multi-temporal ve noktasal bazda yaklaşık 304.140 km bir hat boyunca ele alınmıştır. Elde edilen sonuçlar bir arada ele alındığında önemli bulgulara ulaşılmıştır. İlk olarak, Sentinel-2 görüntüleri yardımıyla hesaplanan NDAVI indeksinin su kalitesi analizlerinin izlenmesinde faydalı bilgiler sağladığı ve su kalitesi parametreleri arasında yer alan Chl-a ve TSM parametreleri ile ters korelasyonlu olduğu tespit edilmiştir. Nitekim, NDAVI değerlerinin yüksek olduğu noktalarda düşük Chl-a ve TSM değerlerine ulaşıırken, düşük indeks değerleri hesaplanan noktalarda söz konusu parametrelerin yüksek değerler aldığı görülmüştür. NDCI indeksi için su kalitesi parametreleri ile belirgin bir korelasyon kurulamamıştır. Gerçekleştirilen çalışma ile nehirleri de içerisine alan sınırlı doğal su kaynaklarının sürekli olarak takibi ve su kalitesinde ortaya çıkabilecek değişimlerinin etkili bir şekilde izlenmesi noktasında mevcut izleme sistemlerine entegre edilebilecek ölçeklenebilir ve otomatik bir yaklaşıma yönelik pilot bir uygulama ortaya koyulmuştur. Ayrıca, elde edilen veriler, başta uzaktan algılama olmak üzere diğer alanlarla entegre edilerek daha geniş çaplı analizler ve değerlendirmeler yapılmasına olanak sağlamaktadır. Çalışmada kullanılan su indeksleri, uzaktan algılama verilerine dayandırılmış, ancak bu verilerin sahadan elde edilen yerinde ölçümlerle doğrulanmamış olması, sonuçların güvenilirliği açısından bir eksiklik olarak değerlendirilebilir. Elde edilen sonuçların geçerliliğinin test edilmesi amacıyla, görüntülerin çekildiği tarihlere paralel olarak gerçekleştirilecek saha çalışmaları ile değerlendirmeye alınan noktalardan su numuneleri alınarak hassas bir şekilde karşılaştırmalı analizler yapılması gerekmektedir. Çalışmada, NDAVI ve NDCI gibi belirli spektral indekslerin kullanılması, su kalitesi analizinde önemli veriler sunmakla birlikte, farklı indekslerin veya makine öğrenimi tabanlı modeller gibi daha karmaşık algoritmaların kullanılması, sonuçların hassasiyetini artırabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte ileriki çalışmalarda literatürde önerilen farklı su indeksleri ve basit oranlamalarda değerlendirmeye alınarak çalışma kapsamının genişletilmesi planlanmaktadır. Diğer taraftan su kalitesindeki değişimlerin tespiti yanında, bu değişimlere etki eden çevresel, iklimsel ve antropojenik etkiler gibi tüm faktörlerin bir arada ele alındığı kapsamlı çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

- Akbar, T., Hassan, Q. ve Achari, G.,** 2010. A remote sensing based framework for predicting water quality of different source waters. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34: 1-4.
- Akın, M. ve Akın, G.,** 2007. Suyun önemi, Türkiye’de su potansiyeli, su havzaları ve su kirliliği. *Ankara Üniversitesi Dil ve Tarih-Coğrafya Fakültesi Dergisi*, 47(2): 105-118.
- Colkesen, I., Sefercik, U.G., Ozdogan, N., Kavzoglu, T., Ozturk, M.Y., Altuntas, O.Y., Nazar, M., Aydin, I. ve Tonbul, H.,** 2024. An Assessment of the Potential Use of Sentinel-2 Imagery and Water Indices in Monitoring Water Quality: A Case Study of Sakarya River. *International Symposium on Applied Geoinformatics (ISAG2024)*, 9-10 May, Wroclaw, Poland.
- Örmeci, C. ve Ekercin, S.,** 2005. Uzaktan Algılama Tekniği ile Tuz Gölünde Su Kalitesi Değişim Analizi. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 28 Mart- 01 Nisan, Ankara, Türkiye.
- Özcan, O.** 2008. Sakarya Nehri alt havzasının taşkın riski analizinin uzaktan algılama ve CBS ile belirlenmesi. Yüksek Lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, İstanbul, 72 sayfa.
- Özer, Ç., ve Köklü, R.** 2019. Aşağı Sakarya nehri su kalitesinin sulama suyu açısından değerlendirilmesi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 5(2): 237-246.
- Soriano-González, J., Urrego, E. P., Sòria-Perpinyà, X., Angelats, E., Alcaraz, C., Delegido, J., Ruiz-Verdu, Antonio, Tenjo, C., Vicente, E. ve Moreno, J.,** 2022. Towards the combination of C2RCC processors for improving water quality retrieval in inland and coastal areas. *Remote Sensing*, 14(5): 1124.
- Tomar, A.,** 2009. Toprak ve su kirliliği ve su havzalarının korunması. *TMMOB İzmir Kent Sempozyumu*, 333-345.
- Topp, S.N., Pavelsky, T.M., Jensen, D., Simard, M. ve Ross, M.R.V.,** 2020. Research Trends in the Use of Remote Sensing for Inland Water Quality Science: Moving Towards Multidisciplinary Applications. *Water*, 12(1): 169.
- Zhao, X., Zhang, J., Li, X., Zhao, J., Yang, C. ve Chen, W.,** 2020. Advances in Remote Sensing Applications for Water Quality Monitoring and Assessment: A Review. *Journal of Environmental Management*, 261: 110355.