

SENTİNEL-2A UYDU GÖRÜNTÜ VERİLERİ İLE GEMLİK KÖRFEZİ'NDE KLOROFİL-A PARAMETRESİNİN ENTERPOLASYON YÖNTEMLERİYLE MODELLENMESİ

Coşkun Özkan¹, Filiz Sunar², Nur Yağmur Aydın³, Adalet Dervişoğlu⁴, Gökhan Kaman⁵

¹Prof. Dr., Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 38280, Talas, Kayseri, cozkan@erciyes.edu.tr

²Prof. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, fsunar@itu.edu.tr

³Öğr. Gör. Dr., Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Gebze, Kocaeli, nyagmur@gtu.edu.tr

⁴Doç. Dr., İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, adervisoglu@itu.edu.tr

⁵YL, TÜBİTAK MAM, Deniz ve Kıyı Araştırmaları Grubu, 41470, Gebze, Kocaeli, gokhan.kaman@tubitak.gov.tr

ÖZET

Klorofil-a (*Chl-a*), fitoplankton biyokütlesinin bir göstergesi olup, deniz ekosistemlerinde kirliliğin izlenmesinde önemli bir su kalitesi parametresidir. Bir ötrofikasyon göstergesi olarak fotosentez yaparak besin döngüsünde birincil organik madde üretimi sağlar. Optik olarak aktif bir bileşen olduğu için kıyı ve körfez gibi iç denizlerde *Chl-a* parametresinin haritalanmasında çok spektrumlu uydu görüntü verileri yaygın olarak Makine Öğrenmesi yöntemleriyle etkin bir şekilde kullanılabilir. Farklı bir yaklaşım olarak bu çalışmada, Gemlik Körfezi'nde *Chl-a* parametresinin dağılımını modellemek için Kriging, Radyal Bazlı Fonksiyon (RBF) ve Ters Mesafe Ağırlıklı (TMA) gibi yaygın enterpolasyon yöntemlerinin kullanımı araştırılmıştır. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ile Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu - Marmara Araştırma Merkezi (TÜBİTAK-MAM) işbirliğinde yürütülen Denizlerde Bütünleşik Kirlilik İzleme Programı (DEN-İZ) kapsamında, yersel su kalitesi ölçmeleri rutin olarak toplanmaktadır. Bu bağlamda 29 Nisan 2021 tarihinde Gemlik Körfezi'nde örneklenen 16 yersel ölçme, referans verisi olarak kullanılmıştır. Modellemede, *Chl-a* parametresinin optik özellikleriyle ilişkilendirilebilmesi için çalışma bölgesine ait 29 Nisan 2021 tarihli Sentinel-2A uydusunun Atmosfer Altı Seviye-2A yansıtma verileri kullanılmıştır. Doğruluk analizi için k-Katmanlı Çapraz Doğrulama yaklaşımının özel bir hali olan Birini Dışarıda Bırakma yöntemi kullanılarak Pearson Korelasyon Katsayısı (r) ve Karesel Ortalama Hata (KOH) değerleri hesaplanmıştır. *Chl-a* parametresinin model dağılımını daha etkin bir şekilde değerlendirebilmek için model tahmin değerleri, uygun bir aralıklandırmayla kategorik değerlere dönüştürülmüştür. Performans ölçütleri ve sınıf dağılımları dikkate alındığında, spektral alanda *Chl-a* parametresinin modellemesinde Kriging ve TMA enterpolasyon yöntemlerinin kullanılabilmesi, ancak RBF yaklaşımının uygun bir yöntem olmadığı değerlendirilmiştir. Hata ölçütlerine göre Kriging en iyi sonuçları verirken, hesaplama karmaşıklığı dikkate alındığında TMA yönteminin optimum bir yöntem olduğu değerlendirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Su Kalitesi, Klorofil-a, Sentinel-2A, Enterpolasyon, Doğruluk Analizi

ABSTRACT

MODELING THE CHLOROPHYLL-A PARAMETER IN THE GULF OF GEMLIK USING INTERPOLATION METHODS WITH SENTINEL-2A SATELLITE IMAGE DATA

Chlorophyll-a (*Chl-a*), an indicator of phytoplankton biomass, is a crucial water quality parameter for monitoring pollution in marine ecosystems. As an indicator of eutrophication, it contributes to the primary production of organic matter through photosynthesis, thus playing a key role in nutrient cycling. Due to its optically active nature, multispectral satellite imagery data are widely and effectively used with machine learning methods to map the *Chl-a* parameter in coastal and bay areas of inland seas. As a different approach, this study investigates the use of common interpolation methods such as Kriging, Radial Basis Function (RBF), and Inverse Distance Weighted (IDW) to model the distribution of the *Chl-a* parameter in the Gulf of Gemlik. In-situ water quality measurements are routinely collected under the Integrated Pollution Monitoring Program (DEN-İZ), conducted in collaboration with the Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change and the Scientific and Technological Research Council of Turkey - Marmara Research Center (TÜBİTAK-MAM). In this context, 16 in-situ measurements sampled in the Gulf of Gemlik on April 29, 2021, were used as reference data. To relate the optical properties of the *Chl-a* parameter, Level-2A reflectance (BOA - Bottom of Atmosphere) data from the Sentinel-2A satellite dated April 29, 2021, were used in the modeling. For accuracy assessment, the Leave-One-Out Cross-Validation method, a special case of the k-Fold Cross-Validation approach, was used to calculate the Pearson Correlation Coefficient (r) and Root Mean Square Error (RMSE) values. To more effectively evaluate the model distribution of the *Chl-a* parameter, model prediction values were converted to categorical values within suitable intervals. Considering performance metrics and class distributions, it was determined that Kriging and IDW interpolation methods can be used for modeling the *Chl-a* parameter in the spectral domain, while the RBF approach is not suitable. Kriging gave the best results in terms of error metrics, but considering the computational complexity, the IDW method was determined to be the most appropriate method.

Keywords: Water Quality, Chlorophyll-a, Sentinel-2A, Interpolation, Accuracy Assessment

1. GİRİŞ

Günümüzde dünya nüfusunun yaklaşık %40'ının yaşadığı kıyı alanları, antropojenik etkinliklerden kaynaklanan etkiler nedeniyle kıyı ekosistemleri için büyük tehdit oluşturmaktadır (Gholizadeh vd., 2016). Bu nedenle, insan faaliyetleri ile iklim değişikliğinin etkisi altında olan kıyı ekosistemlerinin korunması için su kalitesi çok önemlidir. Su kalitesinin bozulması durumunda, zararlı deniz yosunlarının artışı (Karlson vd., 2021), hipoksik (düşük oksijenli) koşulların oluşumu (Lai vd., 2022) ve musilaj gibi önemli su kirliliği olayları meydana gelmektedir (Sunar vd., 2022). Geleneksel yersel su kalite ölçme yöntemleri, su havzalarındaki mekansal ve zamansal değişkenlikleri tam olarak yansıtamamaktadır. Bu nedenle, su kalitesi izleme çalışmalarında rutin alınan yersel ölçmelerin uzaktan algılama teknolojileriyle entegre edilmesi gerekmektedir. Bu yaklaşım, farklı mekansal ve zamansal ölçeklerde su kütlelerinin dinamik izlenmesini ve dağılımının haritalanmasını mümkün kılmaktadır (Hu vd., 2022; Zhu vd., 2022).

Doğal su kütlelerinde bulunan optik olarak aktif bileşenler (OAB) (örneğin askıdaki sedimentler, renkli çözünmüş organik madde (CDOM), Klorofil-a (Chl-a) vb.), suyun ışığı yutma yeteneğini etkileyen doğal optik özelliklere sahiptir. Güneş ışınımla OAB'lerin etkileşiminden kaynaklanan spektral değişiklikler nedeniyle uzaktan algılama, su kalitesi parametreleri, OAB'lerle ilişkilendirilerek belirli doğrulukta tahmin edilebilir (Pizani vd., 2020). Bununla birlikte, besin konsantrasyonları, çözünmüş oksijen seviyeleri ve mikroorganizmalar/patojenler gibi optik olarak aktif olmayan diğer su kalite bileşenleri, uzaktan algılama verileriyle doğrudan tahmin edilemezler; dolaylı olarak tahmin edilebilse de birçok sınırlamayı içerir (Sagan vd., 2020). Genellikle, ilgilenilen su havzasında uydu algılayıcısının ölçtüğü yansıtma ile OAB'ler arasındaki ilişkiyi modellemek için Basit/Çoklu Lineer Regresyon, Üstel Regresyon, LASSO, Destek Vektör Regresyonu, K-En Yakın Komşuluk, Rastgele Orman, Yapay Sinir Ağları vb. gibi farklı makine öğrenmesi yöntemleri mevcuttur (Kupssinskü vd., 2019; Kupssinskü vd., 2020; Sunar vd., 2023a; Sunar vd., 2023b). Ayrıca literatürde mekansal koordinatların göz önüne alındığı Kriging ve Ters Mesafe Ağırlıklı (TMA) enterpolasyon yöntemleri hem OAB'lerin hem de yeraltı sularında arsenik, sodyum vb. bileşenlerin modellenmesinde kullanılmaktadır (Gong vd., 2014; Almodaresi vd., 2019; Kupssinskü vd., 2020; Sunar vd., 2023a).

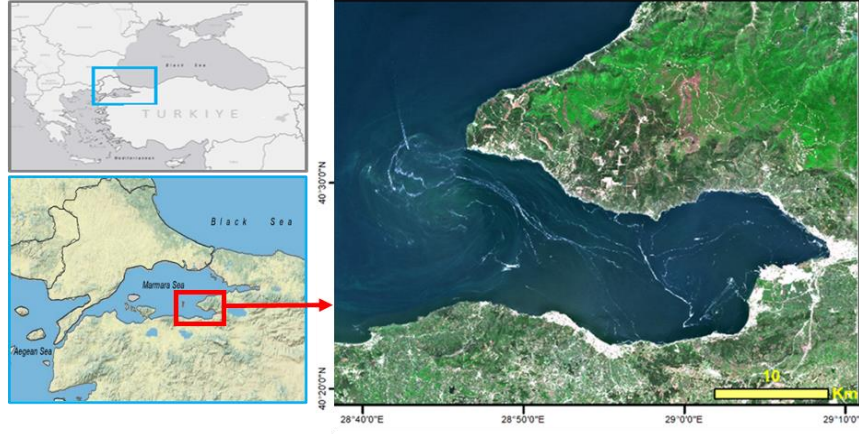
Türkiye'deki deniz ve kıyı sularındaki kirliliğin izlenmesi ve etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla, Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu - Marmara Araştırma Merkezi (TÜBİTAK-MAM) işbirliğiyle 2014 yılından beri Entegre Deniz Kirliliği İzleme Programını (DEN-İZ) yürütmektedir (URL 1). Türkiye'nin kirliliği deniz ekosistemlerinden biri olarak bilinen ve Marmara Denizi'nin güneydoğusunda yer alan Gemlik Körfezi, söz konusu DEN-İZ programı kapsamında değerlendirilen kırılgan kıyı bölgelerinden biridir. Bu çalışmada, bir optik olarak aktif bileşen olan Chl-a parametresinin mekansal dağılımı, eş-zamanlı ölçülen yersel su kalitesi verileri ve Sentinel-2 uydu görüntüleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla, yersel su kalitesi ölçmelerinin uydu verileri ile korelasyonu farklı enterpolasyon modelleri ile belirlenmiş ve sonuçlar doğruluk ölçütleri ile değerlendirilmiştir. Bu çalışma, özellikle mekansal alan için çıkarılan ve kullanılan enterpolasyon yöntemlerinin spektral alana uygulanmasıyla literatüre katkı yapmaktadır. Burada temel alınan yaklaşım, mekansal koordinatlara göre hesaplanan Öklit uzaklığının, spektral bant değerleri kullanılarak hesaplanmasıdır. Diğer bir ifade ile spektral alanda yapılan bu adımda, Chl-a'nın optik özellikleriyle ilişkili olarak uydu görüntüsünde yansıtma değerleri modellemede kullanılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. ÇALIŞMA BÖLGESİ ve KULLANILAN VERİLER

2.1. Çalışma Alanı

Bilindiği üzere evsel, endüstriyel ve tarımsal atıkların deşarj edildiği alanlarda su kalitesi seviyeleri (mezotrofikten ötrofiğe) bozulmaktadır (Tüfekçi vd., 2010). Türkiye yüzölçümünün %2.96'sını kapsayan Marmara Havzası'nda, özellikle İzmit Körfezi ve Gemlik Körfezi ile nüfus, kentleşme ve sanayileşmenin yoğun olduğu İstanbul ve Kocaeli'nde yüksek düzeyde evsel ve endüstriyel atıksu kirliliği gözlenmektedir. Örnek çalışma alanı olan Gemlik Körfezi'nde sadece kentleşme ve/veya sanayileşme değil, artan tarımsal faaliyetler ve körfeze akan Karsak Deresi'nin neden olduğu kirlilik de önemli bir sorun oluşturmaktadır (Teksoy vd., 2019).

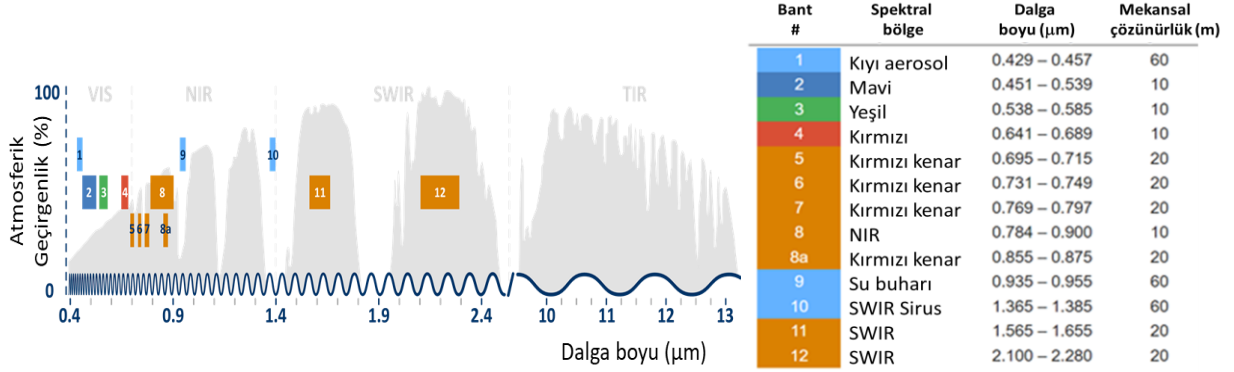
Marmara Denizi'nin güneydoğusunda yer alan Gemlik Körfezi (Şekil 1), Tuzla Burnu'nun doğusunda Gemlik ilçesi önünde 2-6 km, batısında Trilye ve Bozburun arasında 12-24 km genişliğindedir. Körfezdeki ortalama ve maksimum derinlikler sırasıyla 59 ve 107 m'dir. Bu yarı kapalı deniz ekosistemi dinamiğinde baskın bir rol oynayan bölgesel rüzgarlar, çoğunlukla çevredeki dağlar tarafından kontrol edilir ve kış aylarında kuzeybatıdan, yılın geri kalanında ise ağırlıklı olarak kuzeydoğudan eser. Drenaj alanı 27600 km² ve ortalama su debisi 158 m³/s olan Karasu Nehri, bölgenin en önemli coğrafi unsurudur ve iklim koşullarına bağlı olarak günde 0.5-5.5 ton askıda katı maddeyi denize taşımaktadır (Ünlü ve Alpar, 2006).



Şekil 1. Çalışma alanının konumu ve 29 Nisan 2021 tarihli Sentinel-2 uydu görüntüsü (© Copernicus).

2.2. Uydu Verisi

Çalışmada Gemlik Körfezi'nde Chl-a su kalitesi parametresinin tahmini için 29 Nisan 2021 tarihli Sentinel-2A/MSI uydu görüntüsü kullanılmıştır. Açık veri erişim politikası olan Sentinel-2 verilerinin temel özellikleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Sentinel-2A MSI bantları ve temel özellikleri (URL 2).

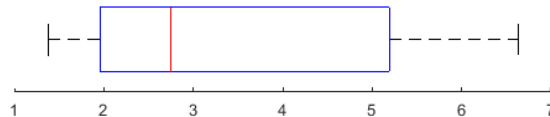
Atmosferik düzeltme, uydu tabanlı su kalitesi izlemenin önemli bir sınırlayıcı faktörü olduğundan, su yansımından elde edilen sonuçların güvenilirliği gerçekleştirilen atmosferik düzeltme işlemine bağlı olacaktır (Warren vd., 2019). Bu çalışmada, ESA/Copernicus tarafından dağıtılan ve SEN2COR paketi ile atmosferik olarak düzeltilen Sentinel-2 Atmosfer Altı (BOA-Bottom Of Atmosphere) Seviye-2A verileri kullanılmıştır. SEN2COR paketi her ne kadar karasal bölgeler için geliştirilen bir düzeltme yöntemi olsa da iç su kütlelerinin atmosferik düzeltilmesinde kullanılabilirliği birçok çalışmada gösterilmiştir (Toming vd., 2016; Warren vd., 2019; Yagmur vd., 2022).

2.3. Yersel Chl-a Ölçmeleri

29 Nisan 2021 tarihinde alınan uydu görüntüsü ile eş-zamanlı ölçülen 16 yersel Chl-a değerleri enterpolasyonda kullanılmıştır. Ölçme sonuçlarına ilişkin genel istatistikler, Çizelge 1'de, kutu grafik ise Şekil 3'te verilmiştir. Bu istatistiksel araçlara göre ölçüm verisinde uyumsuz gözlem yoktur (kartil aralığının 1.5 katı kriterine göre). Verideki varyansın (bilgi içeriği) küçük değerlere doğru kaydığını gösteren sağa (pozitif) çarpık bir dağılım vardır. Ortalama ve medyan arasındaki ilişki bu çarpılmayı nümerik olarak da doğrulamaktadır. Buna rağmen Kurtosis değerine göre uyumsuz gözlem eğilimi düşüktür.

Çizelge 1. Yersel su kalitesi ölçme verilerine ait genel istatistikler.

İstasyon Sayısı	Minimum	Maksimum	Ortalama	Medyan	Standart Sapma	Çarpıklık	Kurtosis	Q ₁	Q ₃
16	1.379	6.627	3.470	2.751	1.852	0.499	1.706	1.959	5.191



Şekil 3. Yersel ölçme verileri kutu grafiği.

3. YÖNTEM

3.1. Enterpolasyon yöntemleri

Genel anlamda enterpolasyon, belirli bir özellik uzayında bilinen noktadaki değerlerin kullanılmasıyla bilinmeyen (boş) diğer noktadaki değerlerin hesaplanması işlemidir. Bu işlem geomatik, meteoroloji, jeoloji, medikal görüntüleme, bilgisayar destekli tasarım gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Enterpolasyon, matematiksel olarak ya tek değerli bir fonksiyon $f: R^N \rightarrow R$ veya çok değerli bir fonksiyon $f: R^N \rightarrow R^M$ şeklinde tanımlanabilir (Amidor, 2002). Örneğin dijital yükseklik modellemede tek değerli $f: R^2 \rightarrow R$ fonksiyonu kullanılırken iki boyutlu benzerlik dönüşümünde $f: R^2 \rightarrow R^2$ iki değerli fonksiyon kullanılır. Bu fonksiyonel ilişkilerin tanımlanması için gereken parametrelerin belirlenmesinde genellikle referans (dayanak) noktası olarak adlandırılan bilinen noktalara ihtiyaç duyulur (Yanalak, 2002). Buna bağlı olarak daha detaylı bir bakış açısıyla bilinen noktaların çerçevelendiği çalışma bölgesi içinde kalan boşlukların doldurulması işlemi enterpolasyon, dışında kalan boşlukların doldurulması işlemi ekstrapolasyon olarak sınıflandırılabilir de, bilinenleri kullanarak bilinmeyenlerin bulunduğu her yaklaşım enterpolasyon genel başlığı altında değerlendirilebilir. Enterpolasyon modelleri hakkındaki bu teorik anlayışa karşın çoğu uygulamada enterpolasyon işlemlerinde rastlantısal belirsizliğe bağlı bir parametre tahmini yapılmaz. Bir başka deyişle, cebirsel anlamda aşırı olmayan tam tanımlı denklem sistemleri oluşturulur. Örneğin a ve b bilinmeyen parametrelerine bağlı olarak herhangi bir x değişkeninin enterpole edileceği $a + bx$ modelinin belirlenmesinde sadece iki dayanak noktası kullanılır. Cebirsel anlamda fonksiyonel model iki bilinmeyen içeren iki denklem yapısında, enterpolasyon modeli geometrik olarak düzlemde iki noktadan hatası geçen bir doğru olur. Buna karşın, regresyon modelleri gibi makine öğrenmesi yaklaşımlarında belirsizliği dikkate alarak parametre tahmini yapan En Küçük Kareler (EKK) yöntemi kullanılır. Buna göre bu tür yöntemler modelin giriş özellikleriyle (bağımsız değişkenler) çıkış (bağımlı) değişkenleri arasında istatistiksel çıkarımsal analizlerin yapılabildiği daha genel bir ilişki oluştururlar. Bu bağlamda $\hat{b} \pm \sigma_{\hat{b}}$ şeklinde güven aralıkları oluşturulabilir ve $H_0: b = 0$ gibi bir temel iddiayı içeren hipotez testleri yapılabilir.

Uygulamada enterpolasyon yöntemleri global-lokal, deterministik-stokastik, C^0 sürekli – C^n sürekli, ikiden büyük boyutlu çalışabilme, ekstrapolasyon yapabilme gibi bir çok faktöre göre sınıflandırılabilir. Matematiksel yapılarının esnekliğine bağlı olarak büyük boyutlu özellik uzaylarına adapte edilebilme özelliklerinden dolayı bu çalışmada Kriging, Radyal Bazlı Fonksiyon (RBF) ve Ters Mesafe Ağırlıklı (TMA) enterpolasyon yöntemleri ele alınmıştır.

3.1.1 Kriging

Madencilik ve jeolojide yaygın kullanılan jeostatistiksel bir yöntemdir. İstasyonerlik kabulü altında bir kovaryans fonksiyonuyla temsil edilen mekansal sürekliliğe göre bilinmeyen noktalardaki değerler hesaplanır. $f: R^2 \rightarrow R$ tek değerli bir fonksiyon olarak planimetrik koordinatlara (X, Y) karşılık gelen herhangi bir özellik (örneğin yükseklik, gürültü, sıcaklık, Chl-a vb.) modellenir. Bu yöntem n tane dayanak noktasının lineer bir kombinasyonudur:

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i Z_i \quad (1)$$

burada w_i , ağırlıkları ve Z_i yaygın kullanımda yüksekliği göstermektedir. Deterministik olan diğer yöntemlerden farklı olarak bu yöntemde, mekansal sürekliliğin stokastik (sistemik olmayan) karakteri bir kovaryans fonksiyonuyla temsil edildiğinden, bilinmeyen bir nokta için enterpole edilen değer hatası (varyansı) hesaplanabilir. w_i ağırlıkları, oluşacak hata değerinin minimize edilmesiyle belirlenir. Bu optimizasyon, yöntemin istatistiksel anlamda “en iyi” (Best) olmasını sağlar. Ayrıca, parametre belirlemede “en iyi olmak” özelliği gibi önemli olan “yansızlık” (Unbiased) özelliği de hedeflendiğinde ağırlıkların toplamının 1 olması koşulu ortaya çıkar ($\sum_{i=1}^n w_i = 1$). Bu kriterlere bağlı olarak Kriging yöntemi “En İyi Yansız Tahmin Edici” (Best Linear Unbiased Estimator) bir yöntemdir. Uygulamada mekansal sürekliliği modellemek için kovaryans fonksiyonundan türetilen yarı-variogram fonksiyonu daha yaygın kullanılır. Yöntemin detayları Isaaks ve Srivastava (1989), Cressie (1993) kaynaklarında bulunabilir.

Chl-a'nın optik olarak aktif olması (elektromanyetik enerjinin suyla olan etkileşiminde tespit edilebilir bir spektral etkinin oluşması) özelliğinin Kriging enterpolasyon yönteminde karşılık bulabilmesi için mekansal alanda modellenen sürekliliğin spektral alanda da yapılması gerekir. Mekansal alanda konum koordinatları kullanılırken spektral alanda çok spektrumlu algılayıcının bant değerleri kullanılır. Yarı-variogram fonksiyonunu tanımlayan giriş değişkeni Öklit uzaklığıdır. Örneğin $P(X_P, Y_P)$ ve $T(X_T, Y_T)$ noktaları için, mekansal alanda bu iki nokta arasındaki uzaklık

$$M_{PT} = \sqrt{(X_P - X_T)^2 + (Y_P - Y_T)^2} \quad (2)$$

iken, N boyutlu spektral alanda bu iki nokta ($P(B1_P, B2_P, \dots, BN_P)$ ve $T(B1_T, B2_T, \dots, BN_T)$) arasındaki uzaklık

$$S_{PT} = \sqrt{(B1_P - B1_T)^2 + (B2_P - B2_T)^2 + \dots + (BN_P - BN_T)^2} \quad (3)$$

ile ifade edilir. Spektral alanda elde edilen bu uzaklıklara göre Chl-a değerlerinin sürekliliğini tahmin eden bir yarı-variogram fonksiyonu elde edilir ve minimum hata ve yansızlık kriterlerine göre ağırlıklar belirlenir.

3.1.2 Radyal Bazlı Fonksiyon (RBF)

Bu yöntem için en yaygın kullanılan yaklaşımda; her bir dayanak noktası için belirli bir $h_i(x, y)$ fonksiyonu seçilir ve bu fonksiyonların herbiri belirli bir a_i katsayısı ile çarpılıp toplanarak bilinmeyen noktadaki değer hesaplanır. n tane dayanak noktası için enterpolasyon eşitliği:

$$Z_i = \sum_{i=1}^n a_i h_i(x, y) \quad (4)$$

Polinomial modeller gibi bir çok farklı tipte fonksiyon seçimi yapılabileceği halde en kullanışlı $h_i(x, y)$ fonksiyonu tek değişkenli radyal fonksiyondur. Tek değişkenli radyal fonksiyon dayanak noktası (x_i, y_i) ile bilinmeyen nokta (x, y) arasındaki Öklit uzaklığıdır:

$$h_i(x, y) = h(\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}) = h(r_i) \quad (5)$$

Konum koordinatlarına göre yapılan enterpolasyon işlemlerinde en yaygın kullanılan radyal fonksiyon, Hardy (1971) tarafından önerilen Dairesel İki Yapraklı Hiperboloid kuadratik fonksiyondur. Buna göre her bir dayanak noktasını merkez alan;

$$h_i(x, y) = [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + c^2]^{1/2} \quad (6)$$

kuadratik fonksiyon yerleştirilir. Genellikle küçük bir değer olan c sabiti 0 olarak alınırsa fonksiyon konik bir yüzeye dönüşür. Buna göre n tane kuadratik yüzeyin ötelenmiş bir toplamı olarak enterpolasyon fonksiyonu:

$$Z = \sum_{i=1}^n a_i [(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + c^2]^{1/2} = \sum_{i=1}^n a_i [r_i^2 + c^2]^{1/2} \quad (7)$$

a katsayıları her bir kuadratik terimin işaretini ve düzlük derecesini belirler (Amidror, 2002). Çoklu kuadratik olarak bilinen bu yöntemle Chl-a değerleri entepole edilirken yine spektral alandaki bant değerlerini esas alan radyal Öklit uzaklıkları kullanılır (Eşitlik 3). Doğal olarak spektral alanda oluşan model geometrik anlamda kuadratik yüzeylerin birleşimi değildir.

3.1.3 Ters Mesafe Ağırlıklı (TMA)

En yaygın kullanılan enterpolasyon yöntemlerinden biri olan bu yöntemde, basitçe entepole edilen noktanın yakın olan dayanak noktalarından uzakta olanlara göre daha fazla etkilenmesi hedeflenir. Yine yakınlık ölçütü olarak Öklit uzaklığı kullanılır. Bilinmeyen nokta, dayanak noktalarının ağırlıklı ortalamasıdır. Yöntemin matematiği aşağıdaki üç eşitlik ile gösterilmektedir.

$$Z = \sum_{i=1}^n w_i Z_i \quad (8)$$

$$w_i = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \quad (9)$$

$$h_i = \frac{1}{S_i^k} \quad (10)$$

Enterpolasyon noktasıyla i dayanak noktası arasındaki S_i Öklit uzaklığı, mekansal alanda Eşitlik 2 veya spektral alanda Eşitlik 3'e göre hesaplanır. k sabiti 1'den büyük bir değer olarak alınır ve dayanak noktalarının etki bölgelerini belirler. k büyüdükçe büyük ağırlıklar daha çok büyürken, küçük ağırlıklar daha çok küçülür. Yukarıdaki gibi hesaplanan ağırlıklar $0 \leq w_i \leq 1$ ve $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ özelliklerine sahiptir (Amidror, 2002).

3.2. Hata Analizi

Hata analizi yapılabilmesi için girdi verilerine karşılık çıktı değerlerin bilindiği test verileri gereklidir. Bir yöntemin ürettiği çıktı değerlerini dolayısıyla hatasını hem o yöntemin elemanları (sabitler ve parametreler) hem de giriş verisini oluşturan özellikler belirler. Test veri sayısı çoksa, statik olarak verinin bir bölümü eğitim için bir bölümü ise hata hesabı için ayrılabilir. Test verisinin eğitim için ayrılan kısmı yöntemin elemanlarının belirlenmesi için kullanılırken, geriye kalan ve yine test verisi olarak adlandırılan kısmı yöntemin hatasını hesaplamak dolayısıyla etkinliğini ortaya koymak için kullanılır. Bu tür bir bölünme veri sayısına bağlı olarak %90-%10, %80-%20, %75-%25 gibi farklı seviyelerde olabilir. Bu statik yaklaşımda bir veri her zaman ya eğitim verisidir yada test verisidir. Bu durum yöntemlerin genellemeyebilme yeteneklerini değerlendirmede az da olsa yanlışlığa neden olabilir. Daha yansız bir değerlendirme için test verisi belirli sayıda alt gruplara ayrılarak her bir grup dolayısıyla bu grup içindeki her bir veri sırasıyla hem eğitim hem test verisi olarak kullanılır. k-Katmanlı Çapraz Doğrulama olarak adlandırılan bu yaklaşımda test gruplarından elde edilen hatalar averajlanarak genel bir doğruluk ölçütü hesaplanır. Eğer test verisi sayısı çok az ise limit bir yaklaşım olarak katman sayısı (k) veri sayısına eşitlenir ve her bir uygulamada sadece bir tane veri test olarak kullanılırken geriye kalan diğer tüm veri eğitim verisi olarak kullanılır. Birini Dışarıda Bırakma (BDB) olarak

adlandırılan bu yöntemle eğitim veri sayısı olabilecek maksimum değerine ulaşırken her bir veri hata hesabına katılmış olur. Bütün modeller için hesaplanan performans ölçütleri, KOH ve Pearson korelasyon katsayısı (r)'dir.

4. UYGULAMA

Enterpolasyon yöntemlerinin uygulanmasında gerekli olan elemanların (modelin sabitleri, parametreleri ve özellikler) belirlenmesinde ve hata hesabında BDB yaklaşımı kullanılmıştır. Toplam 16 dayanak verisi (test verisi) olduğu için modellerin üretimi (eğitim) 15 veriyle yapılmış, hataları ise 16. veri ile hesaplanmıştır. Böylece her bir yöntem 16 kere ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Örneğin Kriging'de teorik yarı-variogram modelinin seçilmesi, TMA'da k sabitinin belirlenmesi gibi kararlar ve karesel ortalama hata (KOH) değerleri bu yaklaşıma göre alınarak hesaplanmıştır. Ayrıca, mekansal alanda modellerin giriş değişkenleri (özellikler) noktaların mekansal koordinatlarıyken, spektral alanda hangi özelliklerin kullanılacağı belirlenmelidir. Özellik seçimi ve/veya çıkartımı olarak adlandırılan bu işlem yöntemlerin performansını önemli derecede etkiler. Bu çalışmada her bir model için sadece özellik seçimi yapılmış ve dayanak noktaları üzerinde en iyi performansı veren özellik vektörü (bant kombinasyonu) BDB yaklaşımına göre belirlenmiştir.

Mekansal alanda Kriging yöntemi uygulanırken teorik yarı-variogram modeli olarak üstel fonksiyon kullanılmıştır. Spektral alanda Kriging yöntemi için seçilen özellik vektörü [2 3 7 12] bant kombinasyonudur. Eşitlik 3'e göre bu 4 boyutlu özellik uzayında hesaplanan Öklit uzaklıkları kullanılarak deneysel yarı-variogram değerleri bulunmuş ve bu değerler kullanılarak lineer teorik yarı-variogram fonksiyonu belirlenmiştir.

RBF uygulamasında mekansal alanda dairesel konik kuadrik yüzey kullanılmıştır (c=0). Spektral alanda dairesel iki yapraklı hiperboloit kuadrik yüzeyi kullanılmıştır (c=0.000999). Özellik vektörü [1 2 11 12] bant kombinasyonu oluşturulmuştur.

TMA enterpolasyon yöntemi uygulanırken Eşitlik 10'daki k sabiti için mekansal alanda 3, spektral alanda 5 değeri alınmıştır. Spektral alanda özellik vektörünü oluşturan bant kombinasyonu [1 2 3 4 12] olarak seçilmiştir.

Mekansal ve spektral alanda elde edilen doğruluk ölçütleri Çizelge 2 ve 3'te verilmiştir.

Çizelge 2. KOH değerleri ve r katsayıları.

	Mekansal	Mekansal	Mekansal	Spektral	Spektral	Spektral
	Kriging	RBF	TMA	Kriging	RBF	TMA
KOH (mg/m ³)	0.83	0.80	0.84	1.38	2.80	1.56
r	0.89	0.90	0.90	0.64	0.13	0.54

Doğruluk ölçütlerine göre Kriging ve TMA yöntemlerinin etkili oldukları görülmüştür. Özellik uzayı boyutu genellikle ikiden daha büyük olan spektral alanda RBF yönteminin performansı düşük çıkmıştır. Chl-a'nın optik özelliklerinin dikkate alınmayıp, modellemenin sadece mekansal komşuluk özelliklerine göre yapıldığı mekansal alanda elde edilen doğrulukların daha yüksek olduğu görülmüştür.

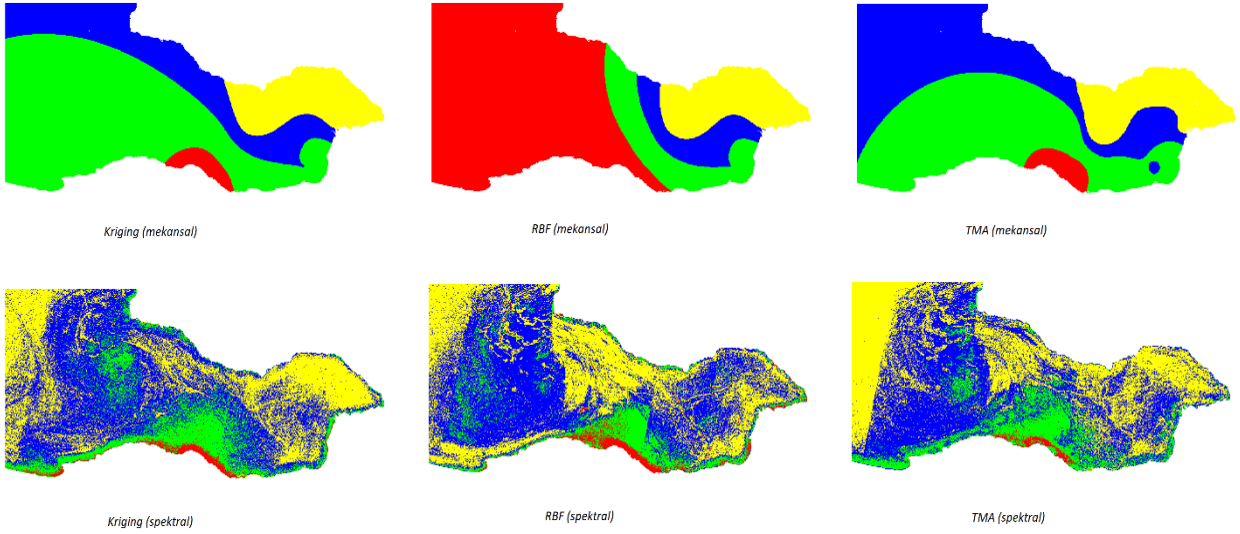
Enterpolasyon yöntemlerinin mekansal ve spektral alanda ürettikleri modellerin dağılımını daha iyi analiz edebilmek için model değerleri aralıklı sınıflandırılarak görselleştirilmiştir. Marmara Denizi'nde bahar ayları için kabul edilen ötrifikasyon kriterleri Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Marmara Denizi'nde bahar ayları için ötrifikasyon kriterleri.

Su Kalitesi Sınıfı	Chl-a (mg/m ³)
Oligotrofik	0 < < 3
Mezotrofik	3 ≤ ≤ 4.3
Ötrofik	4.3 < ≤ 6
Hiperötrofik	6 <

Çizelge 3'e göre bütün modeller için elde edilen Chl-a sınıf dağılımları Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'te verilen sınıf dağılımları incelendiğinde spektral ve mekansal alanlar arasında önemli farklılıklar olduğu görülmektedir. Mekansal alanda sistematik karakterde homojen gruplar oluşurken, spektral alanda daha doğal görünen stokastik ve heterojen dağılımlar oluşmuştur. Kullanılan modelin çalışma mantığına bağlı etkiler olsa da bunun temel nedeni, dayanak noktalarıyla Chl-a değeri tahmin edilecek bilinmeyen noktalar arasındaki mekansal koordinatlara bağlı ilişkinin sistematik olmasıdır. Spektral alanda ise piksel bazlı uydu yansıtma verisinin ne olabileceği bütünüyle rastgele olmasada bu tür sistematiklik içermeyen bir stokastisiteye sahiptir. Bu durum daha açık olarak, örneğin bölgede müsülaj olmasının mekansal alandaki modellemeye etkisinin çok düşük olması veya hiç olmaması ve bir deniz

taşıtı veya güneş parıltısının varlığının spektral alandaki modellemeyi çok etkilemesi ve mekansal alanda bir etkisinin olmaması ile açıklanabilir.

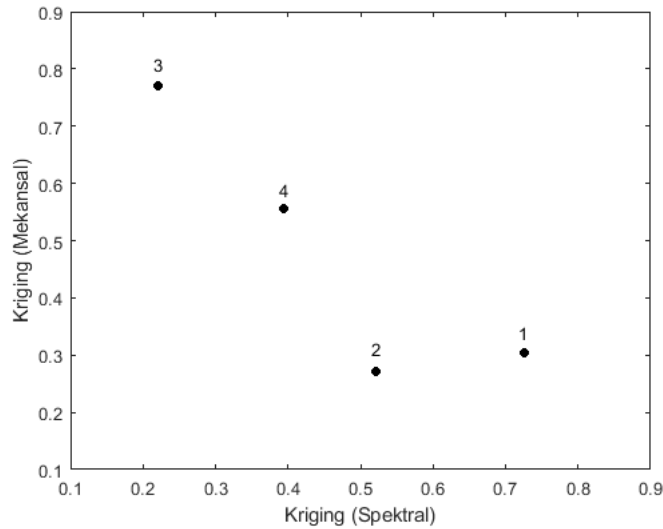


Şekil 4. Chl-a dağılımı: Oligotrofik (sarı), Mezotrofik (mavi), Ötrofik (yeşil), Hiperötrofik (kırmızı).

Kriging yöntemi için mekansal ve spektral alanda üretilen sınıf dağılımlarının çapraz tutarlılığı, Çizelge 4'te verilmiştir. Bu iki yönlü frekans dağılım çizelgesinde üst marjine spektral alanda elde edilen sınıflar, sol marjine ise mekansal alanda elde edilen sınıflar yerleştirilmiştir. Asal köşegen üzerindeki değerler her iki modelde aynı aralığa düşen piksel sayıdır. Çizelgede de görüldüğü gibi çalışma bölgesi toplam 6478680 tane pikselden oluşmaktadır. İki yaklaşım arasındaki tutarlılık %37.11'dir. Spektral alandan mekansal alana olan karşılaştırmada en düşük tutarlılık 3 nolu sınıfta en büyük tutarlılık 1 nolu sınıfta, tersi karşılaştırmada ise en düşük 1 ve 2 nolu sınıflarda ve en yüksek tutarlılık 3 nolu sınıftadır. Sınıflara ait iki yönlü tutarlılık dağılımı Şekil 5'de verilmiştir. İdealde (%100 uyum) tek bir nokta olması gereken bu grafik incelendiğinde iki yaklaşım arasında negatif yönlü bir tutarlılık ilişkisi olduğu söylenebilir.

Çizelge 4. Kriging yöntemine ait çapraz tutarlılık değerleri.

		Spektral					
		Sınıflar	1	2	3	4	Toplam
Mekansal	1	689744	610219	976306	174	2276443	
	2	232712	809268	1948417	2439	2992836	
	3	26089	128506	840478	97296	1092369	
	4	1082	2971	47995	64984	117032	
Toplam		949627	1550964	3813196	164893	6478680	



Şekil 5. Kriging spektral ve mekansal alan modellemelerine ait sınıfların çapraz tutarlılık dağılımı.

5. SONUÇ

Bu çalışmada Chl-a parametresinin modellenmesinde, literatürde yaygın kullanılan makine öğrenmesi ile regresyon tabanlı yöntemler yerine üç farklı enterpolasyon yönteminin potansiyeli hem mekansal hem de spektral alanda incelenmiştir. Bu bağlamda, Gemlik Körfezi'nde 16 noktada yersel ölçmeler ile elde edilen Chl-a ve Sentinel-2A uydusunun yansıtma verileri kullanılarak farklı enterpolasyon yöntemleriyle modelleme yapılmış ve bölgeye ait alansal dağılımlar elde edilmiştir. Performans ölçütleri ve sınıf dağılımları dikkate alındığında, mekansal alandaki model doğrulukları (KOH: 0.80-0.84) spektral alandakilere (KOH: 1.38-2.80) göre daha yüksek çıkmıştır. Yöntem bazında KOH ölçütüne göre mekansal alanda RBF yöntemi ve spektral alanda Kriging yöntemi en iyi sonuçları vermiştir. Özellik uzayı boyutu genellikle ikiden daha büyük olan spektral alanda RBF yönteminin performansı düşük çıkmıştır. Her iki alanda da Kriging ve TMA yöntemlerinin daha etkili oldukları görülmüştür. Ancak tek tarihte yapılan ölçmeler ile Chl-a modellemesinde sadece hata hesabı ve sınıfların dağılımına göre hangi yaklaşımın daha kullanışlı olduğunu belirlemek doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Bu amaca yönelik olarak bölgede farklı disiplinlerde çalışan uzmanlar ile böylesine geniş bir alanda hangi yaklaşımın tercih edilebileceğine karar vermek için farklı mevsimlerde alınmış sık ve rutin yersel ölçmelerle oluşturulacak farklı modellerin detaylı olarak karşılaştırılması gereklidir. Bu durum, özellikle ötrofikasyon tehdidi altına girmiş olan Gemlik Körfezi için çevresel ve/veya dış kaynaklı nütrient girdilerinin azaltılması için belirli zaman dilimlerinde kirlilik değişimini etkileyen önemli faktörlerin tanımlanması ve uygun tedbirlerin alınması açısından da çok önemlidir.

Bu çalışmanın sonuçları, modellemede daha çok mekansal alan için çıkartılan ve kullanılan enterpolasyon (mekansal komşuluk özelliklerinin kullanıldığı) yöntemlerinin spektral alanda (optik özelliklerin kullanıldığı) uygulanması yönüyle bu alandaki çalışmalara yeni bir bakış açısı kazandırmakta ve literatüre katkı yapmaktadır. Çapraz tutarlılık analizi de dikkate alındığında, bütüncül bir perspektifle mekansal ve spektral alanları birleştiren yaklaşımlar da tercih edilebilir. Bu bağlamda, gelecekte özellikle hem optik özellikleri hemde mekansal komşuluk bilgisini bir arada kullanma imkanı sağlayan makine öğrenmesi ve enterpolasyon modellerinin potansiyeli araştırılacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı-ÇEDİDGM/Laboratuvar, Ölçüm ve İzleme Dairesi Başkanlığı'nca yürütülen ve TÜBİTAK-MAM ÇTÜE koordinasyonunda gerçekleştirilen "Denizlerde Bütünleşik Kirlilik İzleme 2020-2022 Programı" kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Almodaresi, S.A., Mohammadrezaei, M., Dolatabadi, M., Nateghi, M.R.,** 2019. Qualitative Analysis of Groundwater Quality Indicators Based on Schuler and Wilcox Diagrams: IDW and Kriging Models. *Journal of Environmental Health and Sustainable Development*, 4, 903–912.
- Amidror, I.,** 2002. Scattered data interpolation methods for electronic imaging systems: a survey. *Journal of Electronic Imaging*, 11, 157–176.
- Cressie, N.,** 1993. *Statistics for spatial data*. John Wiley & Sons.
- Gholizadeh, M.H., Melesse, A.M., Reddi, L.,** 2016. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. *Sensors*, 16(8), 1298.
- Gong, G., Mattevada, S., O'Bryant, S.E.,** 2014. Comparison of the accuracy of kriging and IDW interpolations in estimating groundwater arsenic concentrations in Texas. *Environmental Research*, 2014, 130, 59–69.
- Hardy, R.L.,** 1971. Multiquadric Equations of Topography and Other Irregular Surfaces. *Journal of Geophysical Research*, 76(8), 1905-1915.
- Hu, M., Ma, R., Xiong, J., Wang, M., Cao, Z., Xue, K.,** 2022. Eutrophication state in the Eastern China based on Landsat 35-year observations. *Remote Sensing of Environment*, 277, 113057.
- Isaaks, E. H., Srivastava, R.M.,** 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press.
- Karlson, B., Andersen, P., Arneborg, L., Cembella, A., Eikrem, W., John, U., West, J.J., Klemm, K., Kobos, J., Lehtinen, S., Lundholm, N.,** 2021. Harmful algal blooms and their effects in coastal seas of Northern Europe. *Harmful Algae*, 102, p.101989.
- Kupssinskü, L., Guimarães, T., de Souza, E., Zanotta, D., Veronez, M., Junior, L.G., Mauad, F.,** 2020. A method for chlorophyll-a and suspended solids prediction through remote sensing and machine learning. *Sensors*, 20(7), 2125-2144.

- Kupssinskü, L., Guimarães, T., Freitas, R., de Souza, E., Rossa, P., Ademir Marques, J., Veronez, M., Junior, L.G., Mauad, F., Cazarin, C.,** 2019. Prediction of Chlorophyll-a and Suspended Solids Through Remote Sensing and Artificial Neural Networks. In Proceedings of the 2019 13th International Conference on Sensing Technology (ICST2019), Xian, China.
- Lai, Y., Jia, Z., Xie, Z., Li, S., Hu, J.,** 2022. Water quality changes and shift in mechanisms controlling hypoxia in response to pollutant load reductions: A case study for Shiziyang Bay, Southern China. *Science of The Total Environment*, 842, 156774.
- Pizani, F.M., Maillard, P., Ferreira, A.F., de Amorim, C.C.,** 2020. Estimation of water quality in a reservoir from Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI sensors. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 5(3).
- Sagan, V., Peterson, K.T., Maimaitijiang, M., Sidike, P., Sloan, J., Greeling, B.A., Maalouf, S., Adams, C.,** 2020. Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. *Earth-Science Reviews*, 205, p.103187.
- Sunar, F., Dervisoglu, A., Yagmur, N., Aslan, E., Atabay, H.,** 2023a. The Spatial Distribution of Selected Optical Active Components in The Gulf of Izmit Using Bivariate/Multivariate Regression Analysis. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, Volume XLVIII-M-1-2023 39th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE-39) "From Human Needs to SDGs", 24–28 April 2023.
- Sunar, F., Dervisoglu, A., Yagmur, N., Aslan, E., Özgüven, M.,** 2023b. Analyzing The Retrieval Accuracy of Optically Active Water Components From Satellite Data Under Varying Image Resolutions. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, Volume XLVIII-M-1-2023 39th International Symposium on Remote Sensing of Environment (ISRSE-39) "From Human Needs to SDGs", 24–28 April 2023.
- Sunar, F., Dervisoglu, A., Yagmur, N., Colak, E., Kuzyaka, E., Mutlu, S.,** 2022. How Efficient can Sentinel-2 Data Help Spatial Mapping of Mucilage Event in the Marmara Sea?. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 43, 181-186.
- Teksoy, A., Katip, A., Nalbur, B.E.,** 2019. Monitoring the water quality in Karsak Stream and evaluation of its impact on the Gemlik Bay. *Uludag University Journal of The Faculty of Engineering*, 24(1), 171-180, (in Turkish).
- Toming, K., Kutser, T., Laas, A., Sepp, M., Paavel, B., Nõges, T.,** 2016. First experiences in mapping lake water quality parameters with Sentinel-2 MSI imagery. *Remote Sensing*, 8, 640.
- Tüfekçi, V., Balkis, N., Beken, C. P., Ediger, D. Mantikci, M.,** 2010. Phytoplankton composition and environmental conditions of the mucilage event in the Sea of Marmara. *Turkish Journal of Biology*, 34(2), 199-210.
- URL 1: Denizlerde Bütünleşik Kirlilik İzleme Programı, <https://ced.csb.gov.tr/denizlerde-butunlesik-kirlilik-izleme-programi-i-84266>, Son Erişim tarihi: Temmuz 11, 2024.
- URL 2: <https://blogs.fu-berlin.de/reseda/sentinel-2/> (son erişim 14 Temmuz 2024).
- Ünlü, S., Alpar, B.,** 2006. Distribution and sources of hydrocarbons in surface sediments of Gemlik Bay (Marmara Sea, Turkey). *Chemosphere*, 64(5), 764-777.
- Warren, M.A., Simis, S.G., Martinez-Vicente, V., Poser, K., Bresciani, M., Alikas, K., Spyarakos, E., Giardino, C. ve Ansper, A.,** 2019. Assessment of atmospheric correction algorithms for the Sentinel-2A MultiSpectral Imager over coastal and inland waters. *Remote Sensing of Environment*, 225, 267-289.
- Yagmur, N., Dervisoglu, A., Sunar, F.,** 2022. Evaluation of Atmospheric Correction Processors Applied to the Sentinel-2 Image in the Gulf of Izmit. In 10th International Symposium on Atmospheric Sciences, ITU, Istanbul, s. 18-21.
- Yanalak, M.,** 2002. Sayısal arazi modellerinde yükseklik enterpolasyonu. *Harita Dergisi*, 128, pp.44-58. <https://www.harita.gov.tr/uploads/files/articles/sayisal-arazi-modellerinde-yukseklilik-enterpolasyonu-1014.pdf>.
- Zhu, X., Guo, H., Huang, J.J., Tian, S., Xu, W., Mai, Y.,** 2022. An ensemble machine learning model for water quality estimation in coastal area based on remote sensing imagery. *Journal of Environmental Management*, 323, 116187.