



Araştırma Makalesi / Research Article

## EnMAP Hiperspektral Uydusunun Batimetri Kabiliyeti *Bathymetry Capability of EnMAP Hyperspectral Satellite*

Mehmet Ali AKGÜL 

DSİ 6. Bölge MüdürlüĐü, Bilgi Teknolojileri Şube MüdürlüĐü,  
CoĐrafi Bilgi Sistemleri BaşmühendisliĐi, Adana, Türkiye

Geliş (Received): 16.10.2024 / Düzeltme (Revised): 06.11.2024 / Kabul (Accepted): 02.12.2024

### ÖZ

Rezervuardaki su miktarı göl gözlem istasyonları vasıtasıyla anında tespit edilebilirken, bu değer en son üretilen batimetrik haritaya dayalı olarak hesaplanan miktarı temsil etmektedir. Rezervuara su girişi beraberinde sedimentasyonu da getirmekte, bu da rezervuarda su hacmini azaltmaktadır. Batimetrik haritaların periyodik olarak üretilmesi bu tür değişikliklerin tespiti için gereklidir. Çalışma alanı olarak seçilen Seyhan Barajı, Türkiye'nin güneyinde Çukurova bölgesinde yer almakta olup sulama, taşkın kontrolü ve enerji üretimi amacıyla inşa edilmiştir.

Bu çalışmada, hiperspektral EnMAP uydu verisi ile bağımsız bileşen analizi (ICA), temel bileşen analizi (PCA) ve log oran dönüşümü (LRT) olmak üzere üç yöntem kullanılarak uydu-kaynaklı batimetri (SDB) haritaları üretilmiştir. Ağustos-Eylül 2019 tarihleri arasında sonar yöntemiyle ölçülen batimetrik harita ile 2024 tarihli uydu görüntüsü kullanılarak üretilen SDB haritaları arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışma sonucunda, Pearson korelasyon katsayısı (r) sonuçları açısından en iyi sonuçları 0.811 ile PCA1 ve 0.790 ile LRT yöntemi, ortalama hata (ME) sonuçları açısından -11.822 ile ICA2 ve -12.027 ile LRT, yüzde yanlılık (PB) istatistikleri sonuçları açısından -113.907 ile ICA2 ve -96.640 ile LRT istatistikleri verdiği görülmüştür. Tahminlerin standart hataları da hesaplanmış, en iyi sonucun 0.102 ile LRT yöntemi olduğu görülmüştür. Bu çalışmanın bulguları, hiperspektral EnMAP uydu verilerine dayalı olarak SDB haritalarının üretilmesi aşamasında en uygun analiz yönteminin seçilmesini sağlayacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Uydu Kaynaklı Batimetri, Hiperspektral uydu, EnMAP

### ABSTRACT

*The quantity of water present within a reservoir can be ascertained with immediate effect through the utilization of lake observation stations. However, it should be noted that this figure represents a value derived from the most recently produced bathymetric map. The influx of water into the reservoir is accompanied by sedimentation, which results in a reduction in the volume of water within the reservoir. The periodic production of bathymetric maps is essential for the detection of these changes. The Seyhan Dam, which was selected as the study area, is situated in the Çukurova region of southern Turkey and was constructed for the purposes of irrigation, flood control and power generation. In this study, satellite-derived bathymetry (SDB) maps were produced using hyperspectral EnMAP satellite data, employing three methods: independent component analysis (ICA), principal component analysis (PCA) and log ratio transformation (LRT). The relationship between the bathymetric map, which was measured by the sonar method between August and September 2019, and the SDB maps, which were produced using satellite images dated 2024, was examined. The results of the study indicated that PCA1 with 0.811 and LRT with 0.790 yielded the most optimal outcomes in terms of Pearson correlation coefficient (r) results. In terms of mean error (ME) results,*

*ICA2 was -11.822 and LRT was -12.027, while in terms of percentage bias (PB) ICA2 and LRT yielded -113.907 and -96.640, respectively. Additionally, the standard errors of the estimates were calculated, and the LRT method yielded the most optimal result with a value of 0.102. The findings of this study will facilitate the selection of the most appropriate analysis method for the production of SDB maps based on hyperspectral EnMAP satellite data.*

**Keywords:** *Satellite-Derived Bathymetry, Hyperspectral satellite, EnMAP*

## GİRİŞ

Küresel iklim değişikliği, nüfus artışı ve sanayileşme nedeniyle temiz suya olan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu sebeple, su kaynaklarını korumak için yeni su depolama yapıları inşa edilmekte ve mevcut yapılar gözden geçirilmektedir. Su depolama yapılarında biriken sediman, su hacmini azaltmaktadır ve bu değişim, batimetrik haritalar ile izlenmektedir. Teknolojik gelişmelerle sonar gibi çağdaş yöntemlerin yanı sıra, uzaktan algılama teknikleri de kullanılmaktadır. Bu haritalar, su depolama kapasitesindeki değişiklikleri ve sediman birikim oranlarını belirlemede önemli rol oynamaktadır ve baraj yönetim birimlerine fayda sağlamayı amaçlamaktadır.

Tang vd. (2015) Malezya'nın Langkawi Adası'nda Landsat 8 uydu verilerini kullanarak korelasyon katsayısını 0.90, ortalama kare hatasını (MSE) ise 1.52 m olarak bulmuşlardır. Pacheco vd. (2015) ise Portekiz'in Ria Formosa kıyı şeridinde Landsat 8 kullanarak derinliği 0-12 m arasında değişen bölgelerde MSE'yi 0.89 m olarak rapor etmişlerdir. Bu çalışma, optik algılama sistemlerinin hassasiyetinin derinlikle azaldığını ve özellikle koy gibi bulanıklığın yüksek olduğu yerlerde doğruluğun düştüğünü ortaya koymuştur. Snyder vd. (2016) Haiti açıklarında askıda tortu nedeniyle su derinliğinin optimum seviyeye ulaşmadığını gözlemlemiş ve bu tür alanların uydu batimetrik haritalarından hariç tutulması gerektiğini önermiştir. Bu nedenle, çok zamanlı uydu verileri kullanarak mevsimsel ve bölgesel değişikliklere dikkat etmişlerdir.

Smith vd. (2017) iki farklı yöntem olan log lineer dönüşüm (LLT) ve log oran dönüşümü (LRT) metodlarını karşılaştırmış ve LRT'nin daha etkili olduğunu bulmuştur. Mateo-Pérez vd. (2020) İspanya'daki iki limanda Sentinel-2 verilerini kullanarak destek vektör makinesi (SVM) ile batimetrik haritalar oluşturmuş ve bu haritaları sonar verileriyle kıyaslamışlardır. Sonuçlar tutarlıdır ve bu yöntemin kirli ve bulanık sular için maliyet etkin ve pratik olduğunu belirtmişlerdir. Tang vd. (2021) Malezya'nın Tanjung Kupang bölgesinde Landsat 8 verileri ile Dierssen ve Stumpf modellerini kullanarak batimetrik haritalar üretmişlerdir. Sonuçlar, her iki modelin de başarılı olduğunu ve potansiyel uygulama alanlarına işaret etmiştir. Le Quilleuc vd. (2022) Mayotte adasında Pleiades-1 ve ICESat-2 uydu verileri ile 15 m derinliğe kadar 89 cm hassasiyet elde etmiştir. Mudiyansele vd., (2022) Florida kıyılarında Sentinel-2 uydu verilerini kullanarak lidar batimetri verileri ile karşılaştırmalar yapmış ve 0-13.5 m derinlikte %8 RMS değeri elde etmişlerdir. Son olarak, Kwon vd. (2024) Kore Yarımadası çevresinde Sentinel-2 verilerini kullanarak rastgele orman algoritması ile batimetrik haritalar üretmiş ve sonar verileriyle karşılaştırmıştır. En doğru sonuçların, en berrak suyun bulunduğu Samcheok bölgesinde elde edildiği görülmüştür.

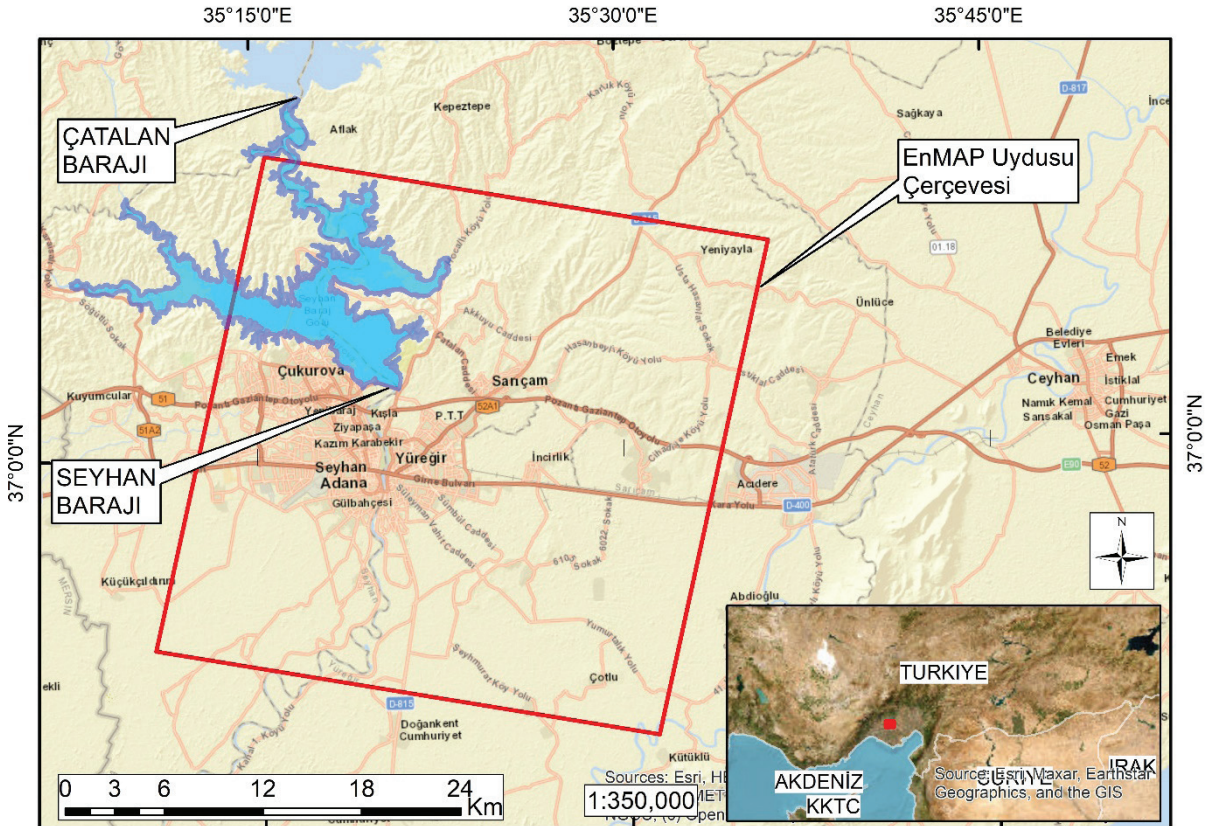
Bu çalışmanın amacı, görevde ikinci yılını dolduran EnMAP hiperspektral uydusunun uydu-kaynaklı batimetri (Satellite-Derived Bathymetry, SDB) kabiliyetini araştırmaktır. Bunun için bağımsız bileşen analizi (Independent

Component Analysis, ICA), temel bileşen analizi (Principal Component Analysis, PCA) ve log oran dönüşümü (Log Ratio transformation, LRT) yöntemleriyle göreceli su derinliği (Relative Water Depth, RWD) haritaları üretilip bu veriler sonar ile ölçülen derinlikler ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada istatistiksel analiz olarak Pearson korelasyon katsayısı ( $r$ ), ortalama hata (ME) ve yüzde yanlışlık (PB) istatistikleri kullanılmış olup noktaların tamamı analiz edilmiş, ayrıca beşer metre derinlik farklı ile çalışma altı ayrı sınıfa ayrılarak tekrar analiz edilmiştir.

## ÇALIŞMA ALANI VE MATERYAL

### Çalışma alanı

Çalışma alanı olarak seçilen Seyhan Barajı, Türkiye'nin güney bölgesinde Seyhan Nehri üzerinde yer almaktadır. Sulama, enerji ve taşkın koruma gibi kritik işlevleri yerine getirmek üzere 1956 yılında işletmeye alınmıştır. Baraj şu anda Aşağı Seyhan Ovası'nın sulanması için ana su kaynağıdır (IECO, 1966; DSİ, 2014). Çalışma alanının konumu Şekil 1'de verilmiştir.



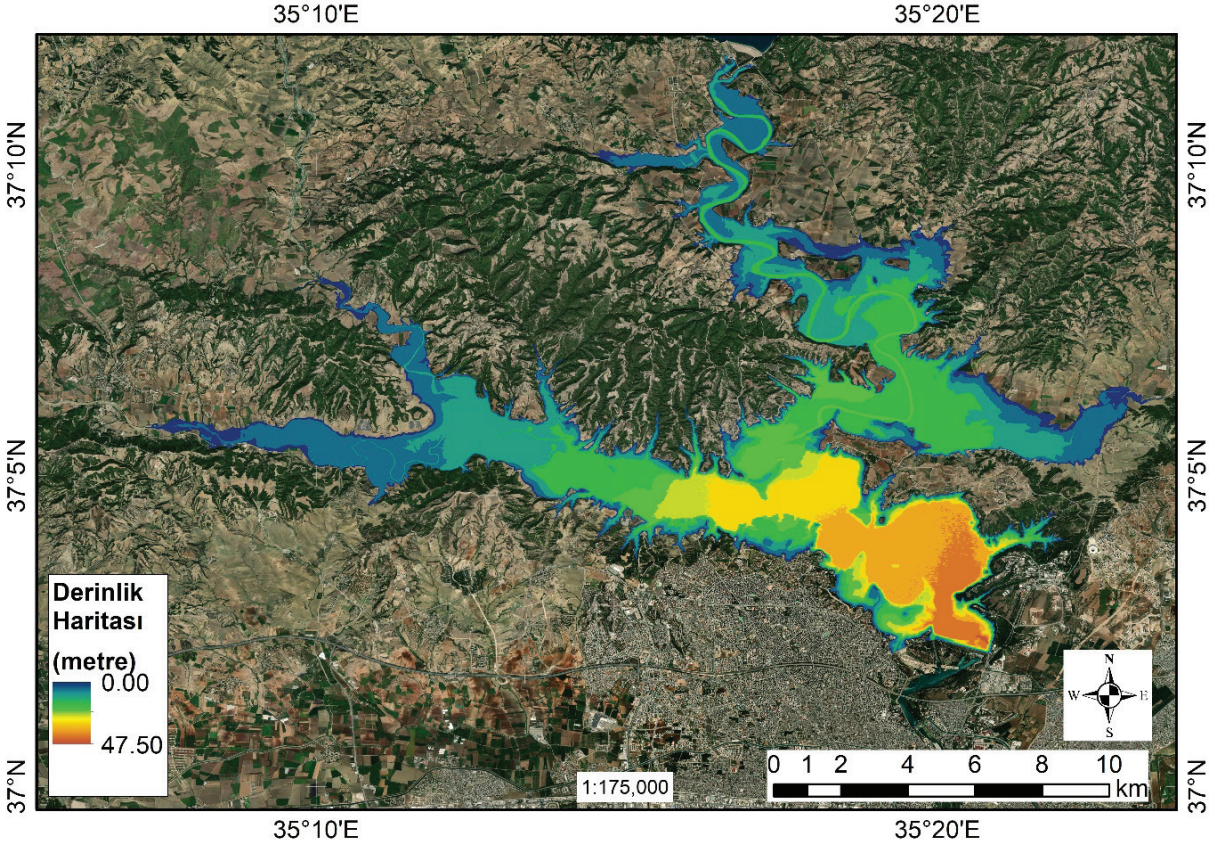
Şekil 1. Çalışma alanı.

Figure 1. Study area.

### Batimetrik harita

Seyhan Barajı'nın batimetrik haritası sonar kullanılarak üretilmiş ve araştırmalar Ağustos-Eylül 2019'da gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 1 Adet Zodiac Bot ve 1 Adet Kontra 4.50 m polietilen bot (190EN) kullanılmıştır. Batimetrik ölçümler, 0.2-1000 m ölçüm aralığına sahip bir Hydrostar Elac 4300 Çift Frekanslı Echo Sounder (33 kHz ve 210 kHz), çift frekanslı bir Ashtech Promark 800 GPS ve Leica Sistem 1200 GPS entegre sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sudaki ses hızının ölçülmesi ve kaydedilmesi için

AML Base X kullanılmış, ölçüler baraj rezervuar tabanından her metre derinlik için ölçülmüştür. Hesaplarda her metre derinlik için o derinliğe karşılık gelen ses hızı dikkate alınmış ortalama değer kullanılmamıştır (DSİ, 2019). Seyhan Barajı batimetrik harita çalışmaları 41 gün sürmüş olup toplam 553461 nokta ölçülmüştür. Seyhan Barajı kreti baz alınarak hazırlanan batimetrik haritası Şekil 2'de verilmiştir. Rezervuarın en derin noktasının baraj kretinden 47.50 m kadar derin olduğu görülmüştür.



Şekil 2. Seyhan Barajı batimetrik haritası.

Figure 2. Bathymetric map of Seyhan Dam.

Seyhan Barajı batimetrik haritaları 1966, 1971, 1976, 1980, 1986 ve 1991 yıllarında klasik yöntemlerle, 2005 ve 2019 yıllarında ise sonar ile ölçülmüştür (Fakıoğlu, 2005; Akgül vd., 2024). Akgül vd. (2024) Seyhan Barajının inşaatından önce yersel olarak yapılan karasal harita ile 1966-2019 yılları arasında yapılan 8 adet batimetrik haritayı kullanarak yaptıkları çalışma sonucunda, rezervuardaki su hacminin 1956-1980 yılları arasında %1.22/yıl, 1980-2019 yılları arasında ise %0.074/yıl oranında azaldığını tespit etmişlerdir. Baraj rezervuarındaki su miktarındaki azalmanın yani sediman birikim miktarının 1980 yılından itibaren durağan bir döneme girdiği görüldüğünden çalışmada 2019 batimetrik haritasına karşılık 2024 yılı uydu verisinin kullanılabileceği düşünülmüştür.

### Uzaktan algılama verisi

Hiperspektral uydu verilerine erişebilmek, geniş bir arşive sahip olan multispektral uydu verilerine göre daha zor olup teknolojik gelişmelere paralel olarak giderek kolaylaşmaktadır. Bu çalışmada kullanılan *Çevresel Haritalama ve Analiz Programı* (The Environmental Mapping and Analysis Program, EnMAP), sık aralıklarla yüksek kaliteli hiperspektral görüntü verileri sağlayan bir Alman hiperspektral uydu misyonudur. Misyonun temel amacı, tarım ve ormancılık, jeoloji ve toprak, kentsel alanlar, kıyı ve iç sular gibi çeşitli alanlarda araştırma ve uygulama için karasal ve sucul ekosistemlerin durumu ve gelişimi hakkında doğru ve teşhis edici bilgiler sağlamaktır. EnMAP, Alman Havacılık ve Uzay Merkezi (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR) tarafından başarılı görev operasyonları sağlamak için ilgili tüm yönleri kapsayacak şekilde işletilmektedir. Bu, çoklu görev altyapılarını kullanarak uydunun kontrol edilmesi ve komuta edilmesinin yanı sıra veri

alımı, kalibrasyon dahil hiperspektral veri işleme, veri arşivleme, veri dağıtımı ve uluslararası kullanıcı topluluğuna web arayüzleri sağlamayı içerir (DLR, 2023). ABD’de Cape Canaveral uzay üssünden Falcon 9 roketiyle 01.04.2022 tarihinde fırlatılan EnMAP uydusu ve üzerinde bulunan hiperspektral görüntüleme algılayıcısı Alman uzay şirketi OHB tarafından üretilmiştir (NASA, 2024).

EnMAP üzerinde VNIR (Görünür/Yakın Kızılötesi) ve SWIR (Kısa Dalga Kızılötesi) olmak üzere iki adet algılayıcı bulunmaktadır. VNIR algılayıcısı, 91 bant üzerinde 4.7 nm ile 8.2 nm (ortalama 6.4 nm) arasında spektral örnekleme mesafesi ile 418.2 nm ile 993.0 nm arasındaki spektral aralıkta algılama yapmaktadır. SWIR algılayıcısı ise 902.2 nm ile 2445.5 nm arasındaki spektral aralıkta algılama yapmakta olup 155 bant üzerinde 7.5 nm ile 12.0 nm (ortalama 10.0 nm) arasında spektral örnekleme mesafesine sahiptir fakat güçlü atmosferik emilimin olduğu aralıklardan kaçınmak için sadece 133 bant aktarılmaktadır (Storch vd., 2023).

*Çalışmada kullanılacak* EnMAP uydu verisinin özellikleri *Çizelge 1’de*, çerçevesi ise *Şekil 1’de* görülmektedir.

EnMAP uydu verileri, Seviye-1B, Seviye-1C ve Seviye-2A olmak üzere üç farklı ürün seviyesinde sunulmaktadır. Seviye-1B ürününde sistematik ve radyometrik düzeltme ile ham görüntü piksel değerlerinin sensör içi radyans fiziksel değerlerine dönüştürmesi yapılır. Seviye-1C ürününde ise geometrik düzeltme ve farklı yöntemler kullanarak görüntülerin ortorektifiye edilmesi gerçekleştirilir (Bachmann vd., 2021). Seviye-2A üründe, Seviye-1C ürünlerinin kara ve su uygulamaları için ayrı ayrı yansımalara dönüştürülmesi yapılmaktadır. Bu iki farklı veri seti kullanıcıya ilgi alanına göre (kara, su veya her ikisi) en uygun görüntüyü seçme

imkânı vermektedir. Seviye-2A ürünüde ayrıca atmosferik düzeltme işlemi de yapılmıştır. Bu işlem, su yüzeyleri için güneş yansıması haritalarının oluşturulması, pus ve bulut tespiti, aerosol optik kalınlığının ve su buharı sütunun tahmin edilmesi ile bu düzeltmelerin uygulanması ile yapılmaktadır (Storch vd., 2023).

Çizelge 1. EnMAP uydusu özellikleri (DLR, 2023).

Table 1. EnMAP satellite features (DLR, 2023).

<b>Yörünge özellikleri</b>		
Yörünge/Eğim	Güneş eşzamanlı / 97.96°	
Zamansal	27 gün (Zenit Açısı<5°) / 4 gün	
Çözünürlük	(Zenit Açısı<30°)	
Ekvator Geçiş saati	11:00 s. ± 18 dak. (yerel saat)	
<b>Cihaz özellikleri</b>	<b>VNIR (görünür / yakın kızılötesi)</b>	<b>SWIR (kısa dalga kızılötesi)</b>
Spektral aralık	420 -1000 nm	900 - 2450 nm
Spektral örnekleme aralığı	6.5 nm	10 nm
Spektral bant genişliği (FWHM)	8.1 ± 1.0 nm	12.5 ± 1.5 nm
Sinyal-gürültü oranı (SNR)	> 400:1 @495 nm	> 170:1 @2200 nm
Spektral kalibrasyon hassasiyeti	0.5 nm	1 nm
Yersel Çözünürlük	30 m (deniz seviyesinde)	
Tarama genişliği	30 km (görüş açısı= 2.63° şerit boyunca)	
Alım uzunluğu	1000 km/yörünge - 5000 km/gün	

Bu çalışmada, <https://eoweb.dlr.de> sitesinden temin edilen 14 Ağustos 2024 tarihine ait L2A- DT0000089572 isimli EnMAP uydu görüntüsü kullanılmış olup veri en gelişmiş ürün olan Seviye-2A ürünüdür.

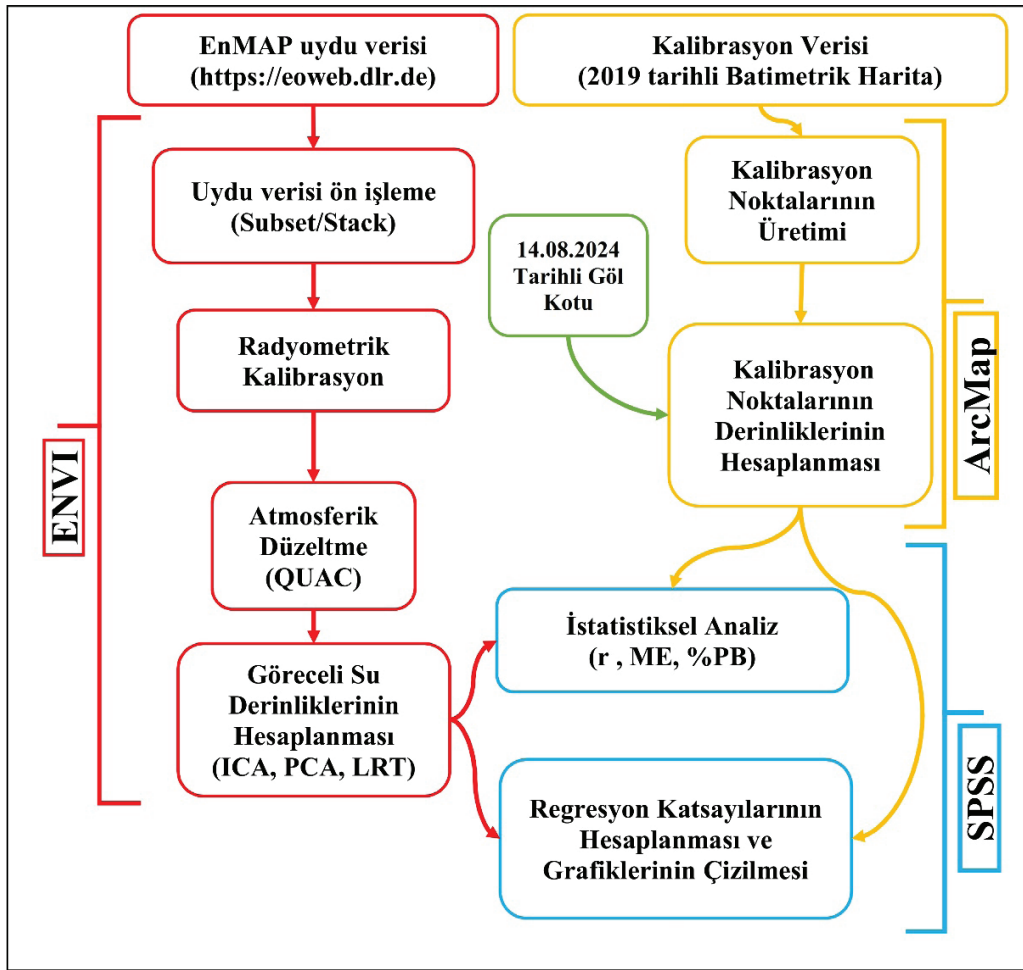
## YÖNTEM

EnMAP uydu verisi <https://eoweb.dlr.de> adresinden temin edilmiştir. Çalışmada kullanılmadan önce görüntülerin radyometrik kalibrasyonu (Canty, 2014) ve atmosferik düzeltmeleri yapılmıştır (Bernstein vd. 2005). Ön işleme aşamalarının tamamlanmasının ardından görüntüler kullanılarak RWD haritaları üretilmiştir. Bu, ENVI yazılımının SPEAR RWD modülüne entegre edilen Bağımsız bileşen analizi (ICA), Temel bileşen analizi (PCA) ve Log Oran Dönüşümü (LRT) yöntemlerinin kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırma Şekil 3'de gösterilen akış diyagramına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

### Uydu Kaynaklı Batimetri (SDB) yöntemleri Bağımsız Bileşen Analizi yöntemi

Bağımsız bileşen analizi (ICA), karıştırma hakkında önceden bilgi gerektirmeyen bir kör kaynak ayırma yöntemidir (Tharwat, 2021) ve Gauss olmayan bağımsız kaynakların varsayımına dayanarak hiperspektral veri kümelerindeki ayırt edici özellikleri tanımlar (Hyvarinen, 1999; Hyvarinen vd., 2000). Uzaktan algılamada ICA, boyut azaltma görüntü özelliklerinin çıkarılması, anomali ve hedef tespiti, sınıflandırma, gürültü azaltma ve haritalama gibi çeşitli tekniklerde kullanılır (NV5, 2024a).

ICA, PCA tekniğinin bir ileri adımı olarak kabul edilir ve orijinal verilerden kaynak sinyalleri veya faydalı bilgileri çıkarmak için güçlü bir araç olarak kabul edilir. PCA, ikinci dereceden istatistikleri temsil eden verilerin kovaryans matrisini optimize etme ilkesini izlerken, ICA basıklık gibi daha yüksek dereceli istatistikleri optimize etme ilkesini izler. Bu nedenle, PCA'nın ilişkisiz bileşenler, ICA'nın ise bağımsız bileşenler ürettiği söylenebilir (Raschka ve Mirjalili, 2017; Saha vd., 2021).



Şekil 3. Çalışmanın akış şeması.

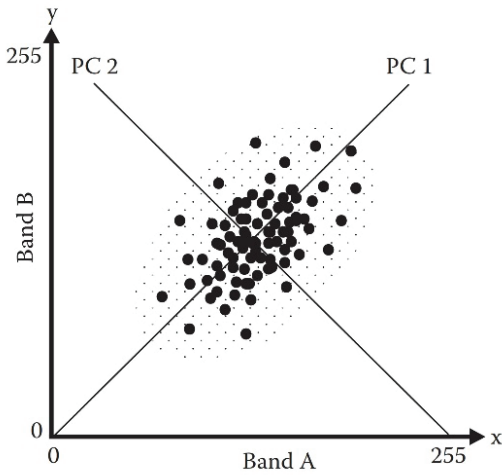
Figure 3. Flowchart for the study.

### Temel Bileşen Analizi yöntemi

Temel bileşen analizi (PCA), çok bantlı görüntülerdeki veri varyansını yeni, ilişkisiz bantlara düzenleyen doğrusal bir dönüşümdür (NV5, 2024b). PCA, veri boyutunun azaltılması ve özellik çıkarımı gibi amaçlarla yaygın olarak kullanılır (Richards, 1993; Schowengerdt, 1997). PCA, veri koordinatlarını döndürerek veri setindeki en önemli bilgileri, kovaryans matrisinden elde edilen öz değerlerin büyüklüğüne göre önceliklendirir (Chang, 2003).

Birbiriyle ilişkili değişkenlerden oluşan çok değişkenli bir veri kümesini, orijinal değişkenlerin yeni ilişkisiz doğrusal kombinasyonlarından oluşan ortogonal olan yeni bir eksen kümesine dönüştürür. Üçten fazla bant eklendiğinde, elipsin boyutu bir hiperelipsoide dönüşür. Temel bileşenler fikri artık elipsin/elipsoidin ana eksenlerine paralel yeni spektral veri eksenleri oluşturmaktır. Bu şekilde, ortaya çıkan ilk temel bileşen PCA1, elipsin en uzun olan ana eksenine karşılık gelmekte olup sonraki tüm bileşenler ilk

bileşene diktir (Pohl vd., 2016). İki boyutlu bir durum için PCA1 ve PCA2'yi gösteren grafik Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4. PCA1 ve PCA2'yi temsil eden yeni koordinat sistemi (Pohl vd., 2016).

Figure 4. New coordinate system representing PCA1 and PCA2 (Pohl et al., 2016).

PCA, öngörücü modellerin oluşturulmasından önce keşifsel veri analizi için bir kaynak araç olarak kullanılmakta olup temel avantajı, yüksek boyutlu bir uzaydan düşük boyutlu bir uzay üretirken varyansı mümkün olan en büyük ölçüde korumak ve böylece modeli boyutsallıktan korumaktır (Saha vd., 2021). PCA'nın güçlü yönleri hiperspektral verileri kullanarak sınıflandırma modelleri oluşturmada en yaygın kullanılan boyutsallık azaltma tekniği haline getirmektedir (Rojas-Moraleda vd., 2017; Erkinbaev vd., 2019).

### Log Oran Dönüşümü yöntemi

Log Oran Dönüşümü (LRT) yaklaşımı ABD Ulusal Okyanus ve Atmosfer İdaresi (NOAA) tarafından geliştirilmiştir ve su derinliğini taban albedodan bağımsız bir şekilde hesaplamak için Formül 1'de verilen ampirik bir denklem kullanmaktadır (Stumpf vd. 2003).

$$Z = m_1 \left( \frac{\ln(nL(\lambda_i))}{\ln(nL(\lambda_j))} \right) - m_0 \quad (1)$$

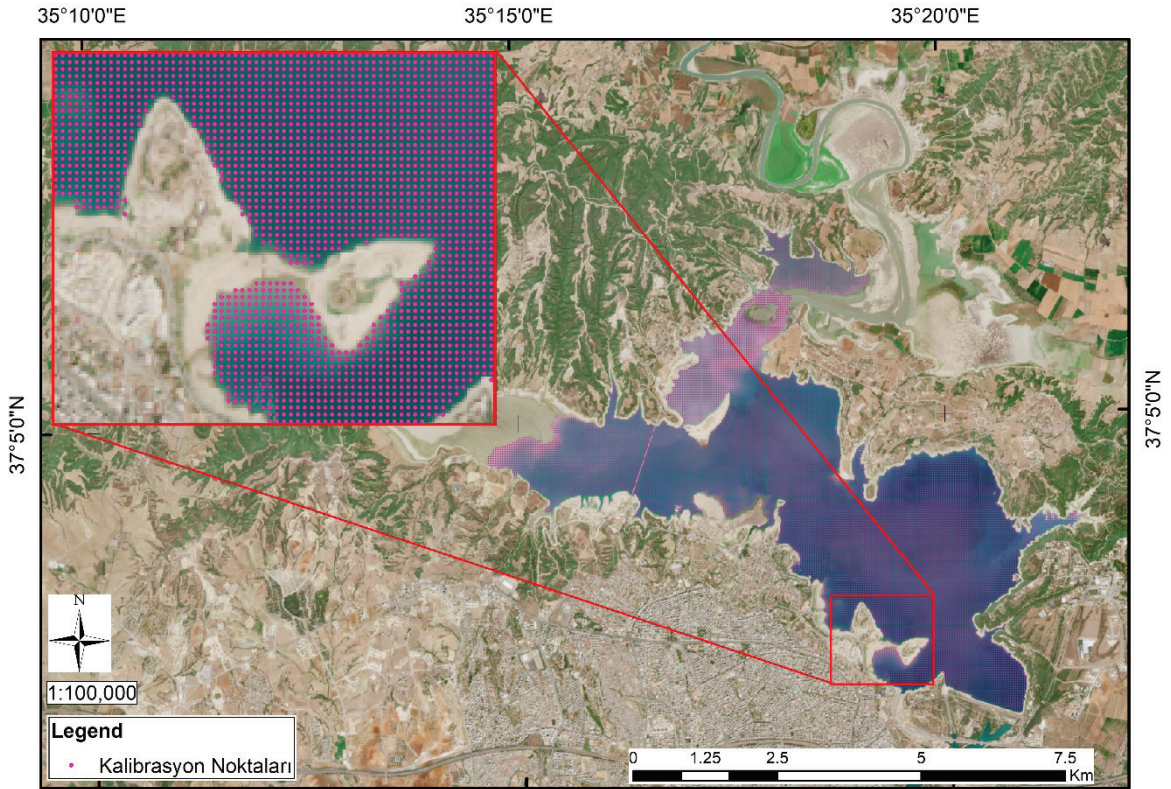
n, m1, m0 değerleri sabit katsayılar, Z derinlik, L( $\lambda_i$ ) mavi bandın radyans değeri ve L( $\lambda_j$ ) yeşil bandın radyans değeridir.

LRT yaklaşımı, suyun farklı bantlar tarafından emiliminin değiştiği varsayımına dayanır ve bu nedenle, her bant için soğurulma oranının derinliğe göre değişmesi beklenir. Derinliğin bu oran doğrultusunda artması öngörülmektedir (Stumpf vd., 2003). LRT, yansıtıcılığın zayıf olduğu sığ denizlerde, diğer modellere göre derinlik tahmininde daha yüksek doğruluk sağlamaktadır (Said vd., 2017).

### Kalibrasyon noktalarının üretimi

Kalibrasyon noktaları ESRI (2011)'de açıklanan metodoloji kullanılarak ArcMap'te oluşturulmuştur (Şekil 5). Her pikselin merkezine bir adet nokta olacak şekilde üretilen noktalar toplamda 26935 adettir. Ayrıca çalışmada EnMAP uydusunun farklı derinliklerde de kabiliyeti test edilmiş olup kalibrasyon noktaları 6 ayrı gruba ayrılmıştır. Derinlik olarak 0-5 metre arasında 6578 nokta, 5-10 metre arasında 3015 nokta, 10-15 metre arasında 6312 nokta, 15-20 metre arasında 4878 nokta, 20-25 metre arasında 6076 nokta ve 25-31 metre arasında 76 nokta kalibrasyonda kullanılmıştır. Rezervuar su kotu, EnMAP uydusunun geçtiği 14 Ağustos 2024 tarihinde göl gözlem istasyonundan 56.047 metre olarak ölçülmüştür.





Şekil 5. Kalibrasyon noktalarının konumu.  
Figure 5. Location of calibration points.

## İstatistikler

EnMAP uyduları tarafından üretilen batimetrik haritalar ile sonar ile oluşturulan haritalar arasındaki ilişki, istatistiksel yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Korelasyon verileri, Pearson korelasyon katsayısı ( $r$ ), ortalama hata (ME) ve yüzde sapma (PB) gibi karşılaştırmalı istatistiklerle analiz edilmiştir. Bu istatistiklerin nasıl hesaplandığı Formül (2), (3) ve (4) 'de gösterilmiştir.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})(C_i - \bar{C})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^N (G_i - \bar{G})^2) \sqrt{(\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2)}} \quad (2)$$

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - G_i) \quad (3)$$

$$PB = 100 \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - G_i)}{\sum_{i=1}^N G_i} \quad (4)$$

Bu formüllerde:  $G$ = Sonar derinliği,  $\bar{G}$  = Sonar derinlik ortalaması,  $C$ = RWD değeri,  $\bar{C}$  = RWD değerlerinin ortalaması,  $N$ = Veri sayısıdır.

Gözlenen ve beklenen değerler arasındaki ilişkiyi ölçen  $r$  istatistiği -1 ile 1 arasında bir değere sahiptir; sifıra yakın değerler ilişki olmadığını, bire yakın değerler ise güçlü bir ilişkiyi gösterir. İstatistik, 0.5'ten büyükse kabul edilebilir olarak değerlendirilir (Van Liew vd., 2003). Ortalama hata (ME) istatistiği, aşırı (pozitif) veya düşük (negatif) tahminleri tespit ederken, yüzde sapma (PB) istatistiği tahmin

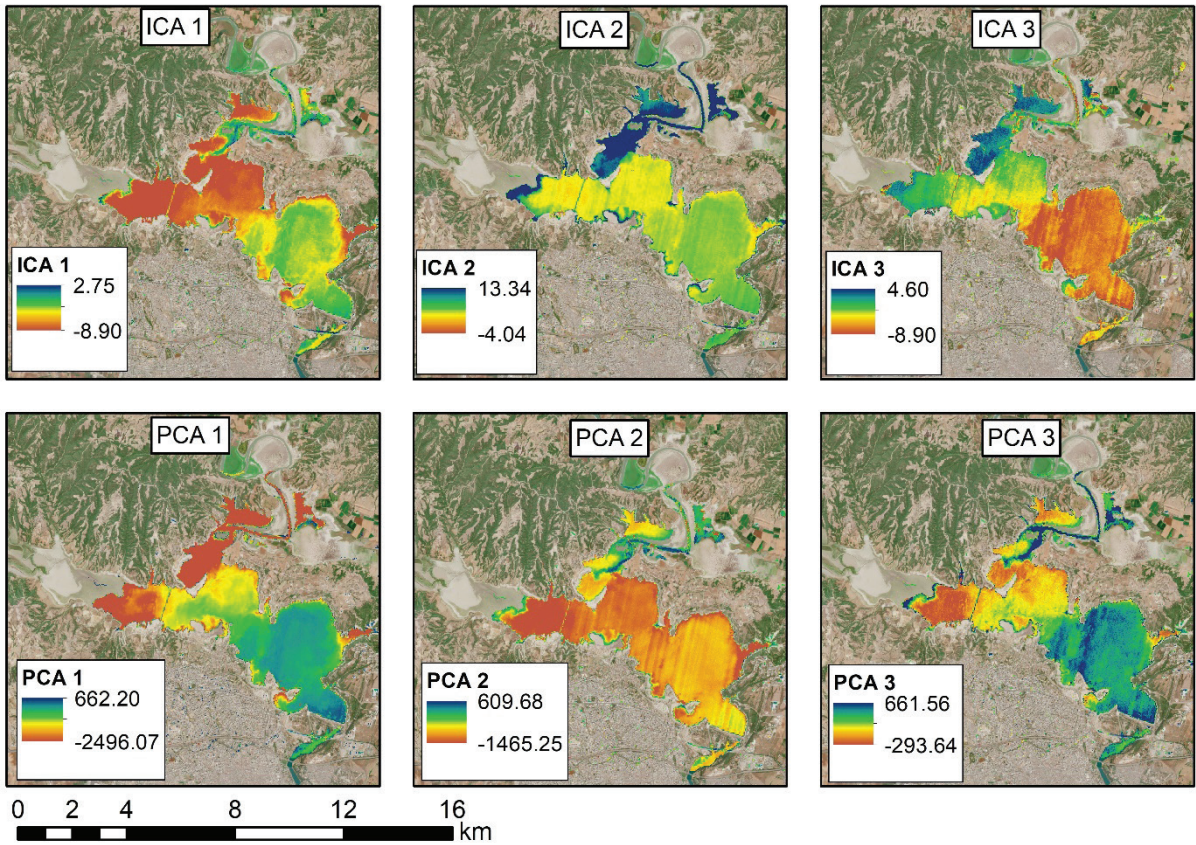
ve gözlem verileri arasındaki eğilimi hesaplar. PB değeri sıfıra yakınsa, tahmin ve gözlemler arasındaki bağlantı güçlüdür; pozitif değerler düşük, negatif değerler ise yüksek tahmini gösterir (Gupta vd., 1999).

## BULGULAR VE TARTIŞMA

### Bulgular

Hiperspektral EnMAP uydu görüntüleri kullanılarak RWD haritaları oluşturulmuştur. Görüntüler, SPEAR RWD modülü ile ICA, PCA

ve LRT yöntemleri kullanılarak üretilmiş olup ICA ve PCA RWD haritaları Şekil 6'da LRT RWD haritası Şekil 7'de verilmiştir. Özellikle ICA2, ICA3 ve PCA2 RWD haritalarında derin bölgelerin negatif, sığ bölgelerin pozitif değerler aldığı görülmüştür. Bu sonuç Çizelge 2'de verilen r istatistik sonuçlarına negatif korelasyon olarak yansıdığı gibi Şekil 8'de verilen regresyon grafiklerinde de regresyon doğrusunun yönünü aşağı yönlü olmasına sebep olmuştur.



Şekil 6. ICA ve PCA RWD haritaları.

Figure 6. ICA and PCA RWD maps.

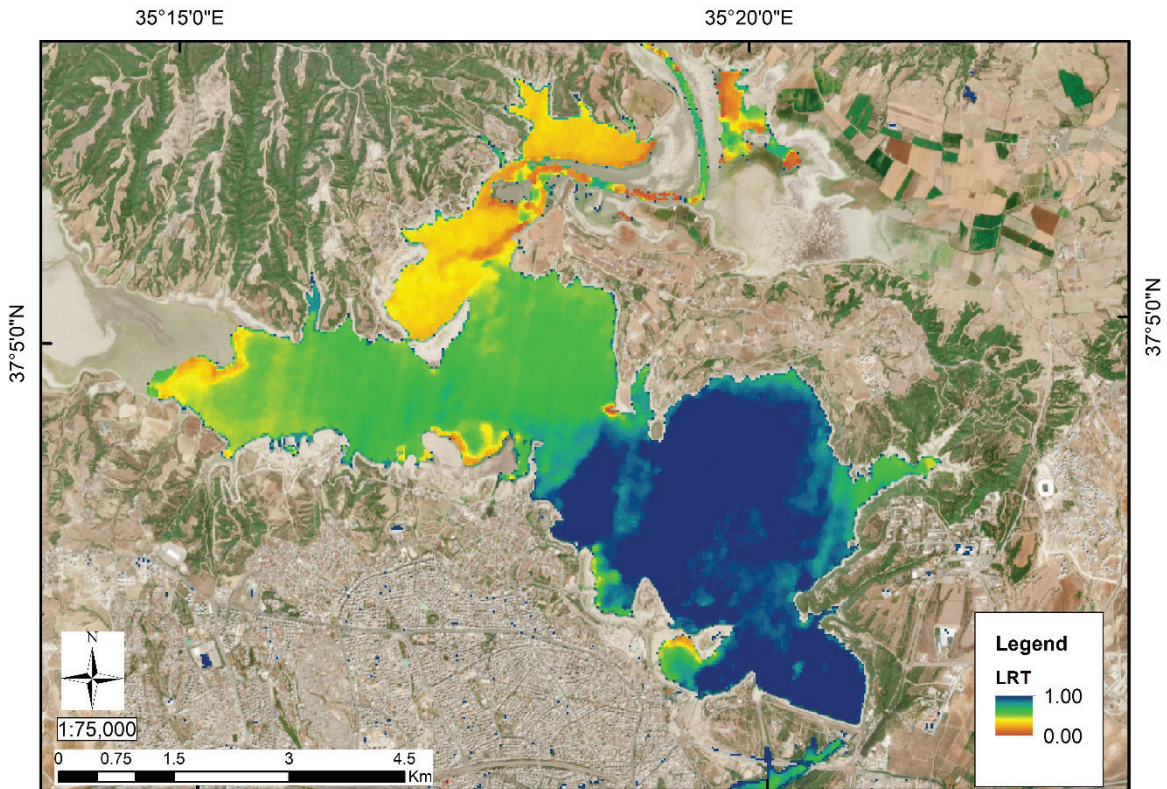
ICA1, PCA1, PCA3 ve LRT RWD haritalarında da rezervuarın derin bölgelerinden sıg bölgelere doğru haritadaki piksel değerlerinin düştüğü görülmüş olup bu sonucun Çizelge 2'deki r istatistiği sonuçlarına yansıdığı ve Şekil 8'de gösterilen regresyon grafiklerinden de anlaşılmıştır.

Bu çalışmada, üç ICA, üç PCA ve LRT yöntemleri kullanılarak yedi farklı RWD haritası üretilmiştir. Bu haritalar daha sonra 2019 yılında sonar kullanılarak üretilen gerçek batimetrik harita ile karşılaştırılmıştır.

İstatistiksel analizlerde, SPSS programı (Huizingh, 2007) yardımıyla Formül (1), (2) ve (3)'de verilen formüller kullanılmış ve r, ME

ve PB istatistiklerinin sonuçları ile tahminin standart hatası (Std. Err. of Est.) elde edilmiştir (Çizelge 2).

Analiz sonucunda, Pearson korelasyon katsayısı (r) sonuçları açısından en iyi sonuçları 0.811 ile PCA1 ve 0.790 ile LRT yöntemi, ortalama hata (ME) sonuçları açısından -11.822 ile ICA2 ve -12.027 ile LRT, yüzde yanlışlık (PB) istatistikleri sonuçları açısından -113.907 ile ICA2 ve -96.640 ile LRT istatistikleri verdiği, tahminlerin standart hataları incelendiğinde ise en iyi sonucun 0.102 ile LRT yöntemi olduğu görülmüştür. Her üç istatistik sonucu ve tahminin standart hataları incelendiğinde LRT sonucunun öne çıktığı görülmüştür.



Şekil 7. LRT RWD haritası.

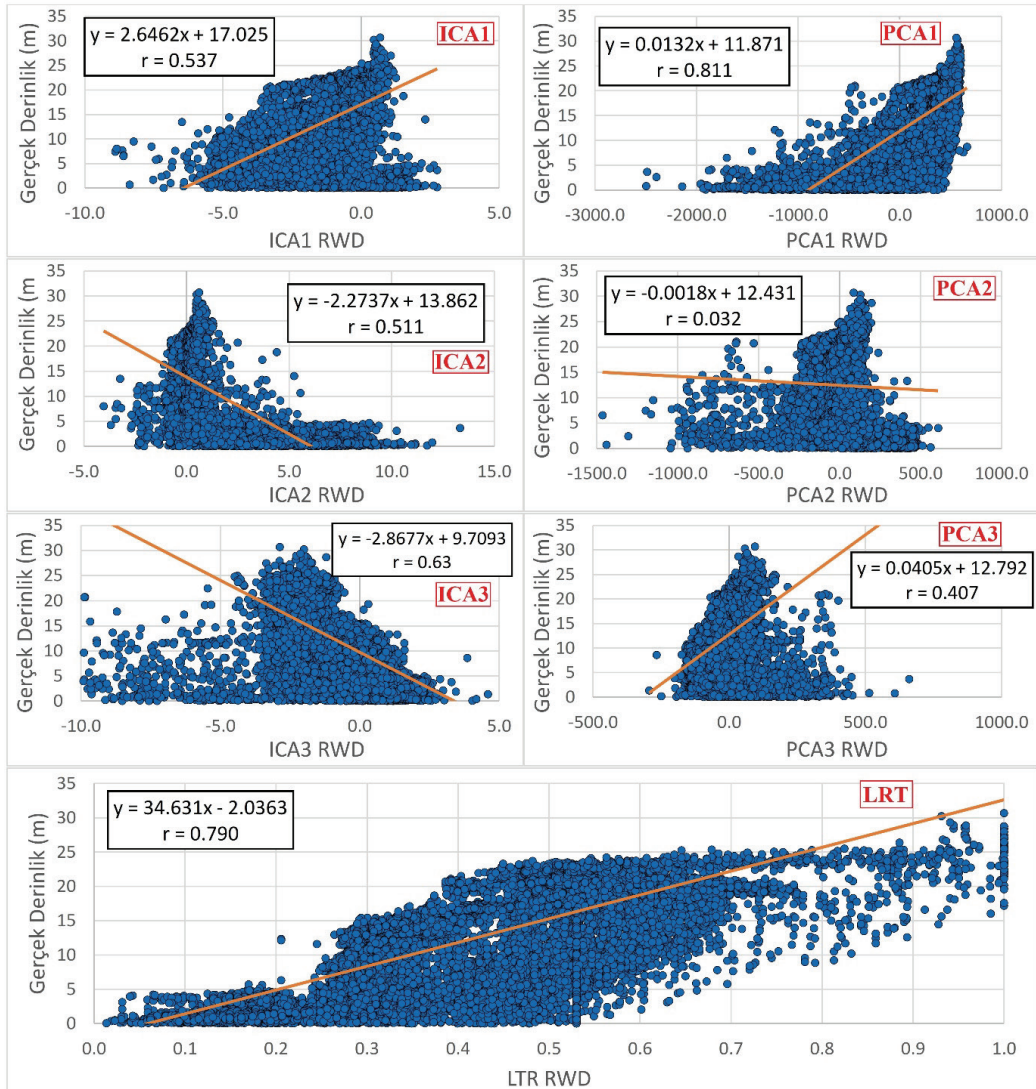
Figure 7. LRT RWD map.

Akgül

Çizelge 2. Analiz sonuçları.

Table 2. Analysis results.

Sta.	ICA1	ICA2	ICA3	PCA1	PCA2	PCA3	LRT
r	0.537	-0.511	-0.630	0.811	-0.032	0.407	0.790
ME	-14.176	-11.822	-13.399	31.190	-20.037	-21.012	-12.027
PB	-113.907	-94.993	-107.665	250.623	-161.008	-168.840	-96.640
Std. Err	1.251	1.412	1.247	263.478	133.150	67.006	0.102

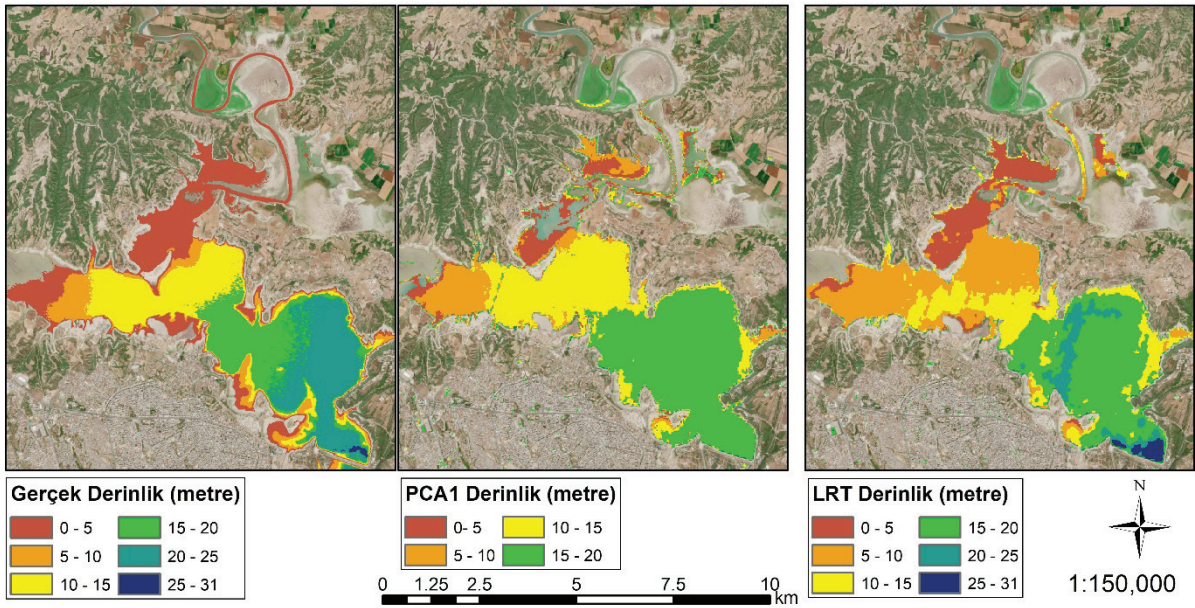


Şekil 8. Gerçek su derinliği ile ICA, PCA, LRT RWD arasındaki regresyon katsayıları ve grafiği.

Figure 8. Regression plot between actual water depth and ICA, PCA and LRT RWD.

Analiz sonuçları Çizelge 2’de verilen, gerçek derinlik ve ICA, PCA ve LRT yöntemleriyle hesaplanan RWD değerleri arasındaki korelasyonun regresyon katsayıları ve grafikleri Şekil 8’de verilmiştir. Pearson korelasyon katsayısı (r) sonuçlarında negatif korelasyon olarak görülen ICA2, ICA3 ve PCA2 analizlerine ait Şekil 8’de verilen regresyon grafiklerinde regresyon doğrusunun yönünün aşağı yönlü olduğu, ters orantılı olarak derinlik arttıkça bu üç analiz sonucunda elde edilen değerlerin azaldığı görülmüştür. Ayrıca en iyi sonuçları veren PCA1 ve LRT analizlerinin regresyon doğrularının yukarı yönlü olduğu, analizler sonucunda bulunan derinlik değerleri ile gerçek derinlik değerlerinin doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür.

Pearson korelasyon katsayısı (r) istatistiği baz alındığında en iyi sonucu veren PCA1 ve LRT analizlerine ait Şekil 8’de verilen regresyon katsayılarının Şekil 6’da verilen PCA1 RWD ve Şekil 7’de verilen LRT RWD haritalarına uygulanmasıyla PCA1 ve LRT derinlik haritaları üretilmiştir (Şekil 9). PCA1 analizinin, r istatistiği açısından LRT analizinden daha iyi sonuç vermesine rağmen derinlik dağılımı açısından LRT derinlik haritasının gerçek derinlik haritasına daha çok uyumlu olduğu görülmüştür. ME ve PB istatistikleri açısından LRT yönteminin PCA1 yönteminden daha iyi çıkmasının ve tahminin standart hatası açısından LRT yönteminin diğer altı yöntemden daha iyi olmasının sebebinin bu uyum olduğu düşünülmektedir.



Şekil 9. Gerçek su derinliği, PCA1 derinlik ve LRT derinlik haritaları.

Figure 9. Maps of actual water depth, PCA1 depth and LRT depth.

Akgül

Çizelge 3. Derinlikler için r istatistik sonuçları.

Table 3. *r* statistic results for depths.

Derinlik (metre)	ICA1	ICA2	ICA3	PCA1	PCA2	PCA3	LRT
0-5	-0.435	-0.521	-0.050	0.342	-0.413	-0.354	0.296
5-10	-0.032	-0.094	0.042	0.015	-0.003	-0.055	0.000
10-15	0.312	0.134	-0.106	0.348	0.295	0.187	0.085
15-20	0.611	0.441	-0.486	0.600	0.360	0.560	0.591
20-25	0.254	0.347	0.102	0.191	0.313	0.079	0.261
25-31	0.130	0.068	0.049	0.146	0.141	-0.015	0.306

Ayrıca, çalışma altı farklı sınıfta (0-5, 5-10, 10-15, 15-20 ve 25-31 m), her bir sınıfta 5 m derinlik farkı ile yeniden analize tabi tutulmuştur. En iyi sonuçların 15 ila 20 m arasındaki derinliklerde, en az zayıf sonuçların ise 0 ila 5 m arasındaki derinliklerde olduğu görülmüştür. Sığ sulardaki düşük sonuçların, SDB haritalarının önemli bir sınırlamasını temsil eden bulanıklık olduğu düşünülmektedir. Analiz sonuçları altı farklı derinlikte en etkili yöntemlerin sırasıyla PCA1 ve LRT olduğunu, en az etkili yöntemin ise ICA3 olduğunu ortaya koymuştur (Çizelge 3).

## Tartışma

SDB yöntemiyle batimetrik haritalar daha hızlı, daha ekonomik ve belirli hassasiyette üretilebilmesine karşın bu yöntemin bazı limitleri bulunmaktadır. Özellikle optik uyduların en büyük dezavantajı olan bulutluluk, atmosferik düzeltme algoritmaları ile giderilebilen su yüzeyindeki güneş parıltısı ve suyun bulanıklığıdır. Bulanıklık, SDB yöntemleriyle harita üretiminde su derinliğinin olduğundan daha az tahmin edilmesine neden olmaktadır (Stumpf vd., 2003). Suda bulanıklığa ise renkli çözülmüş organik madde (Coloured Dissolved

Organic Matter, CDOM) ve toplam askıda sediment (Total Suspended Sediment, TSS) sebep olmaktadır (Wenzl, 2018; Caballero vd., 2023).

Akgül vd. (2018) Seyhan Baraj rezervuarında çok zamanlı uydu verileri ile sonar batimetrik haritasını karşılaştırarak, TSS değerinin SDB yöntemiyle üretilen batimetrik haritaya etkisini araştırmışlardır. Landsat 8 uydusuna ait 2017 yılının 8 farklı ayındaki SDB haritalarını analiz ettikleri çalışmada, rezervuara giren akımların debilerinin ve TSS miktarlarının en az olduğu yaz aylarında SDB haritalarının daha hassas olduğunu tespit etmişlerdir. Çalışma sonunda, rezervuara giren akımlar biliniyorsa görüntü seçilirken debilerin düşük olduğu tarihlerin kullanılmasının daha uygun olacağını, rezervuara giren akımlar bilinmiyorsa su derinliğini doğrudan etkileyen TSS'den kaynaklı hataların çok zamanlı uydu verileri yardımıyla elemine edilebileceği sonucuna varmışlardır. Darama vd. (2019) Türkiye'nin kuzey-batısında yer alan Hasanlar Barajı rezervuarında 2014 yılında sonar ile ölçülmüş batimetrik haritayla 2 Temmuz 2017 tarihli Landsat 8 uydu verisinden üretilen SDB haritasını karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda iki harita arasındaki korelasyonun determinasyon katsayısını ( $R^2$ )

0.833 olarak hesaplamışlardır. Güvel vd. (2021) Seyhan Barajının 40 km batısında yer alan Berdan Barajı rezervuarında sonar yöntemiyle Temmuz 2019 tarihinde ölçülmüş batimetrik haritayla 28 Temmuz 2019 tarihli Sentinel-2 uydu verisinden üretilen SDB haritasını karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda iki harita arasındaki korelasyonun  $R^2$  değerini 0.9442 olarak bulmuşlardır. Akgül ve Yurtal (2023) Seyhan Baraj rezervuarındaki TSS'nin alansal dağılımı ve zamansal değişimini tespit edebilmek için Ocak 2020 ile Ağustos 2021 tarihleri arasında 20 adet Sentinel-2 uydusunu kullanarak bir çalışma yürütmüşlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda TSS değerlerinin rezervuar ortalamasının 2021 yaz aylarında istikrarlı duruma geldiğini tespit etmişlerdir. Akgül (2024) Berdan Barajı rezervuarında Temmuz 2019 tarihinde sonar batimetrik haritası ile 28 Temmuz 2019 tarihli Landsat 8 ve Sentinel-2 uydularından üretilen SDB haritalarını karşılaştırmışlardır. Çalışma alanından aynı gün geçiş yapan iki uydunun SDB kabiliyetini karşılaştırdıkları çalışma sonucunda Landsat 8 uydusuna ait Pearson korelasyon katsayısını ( $r$ ) 0.67, Sentinel-2 uydusuna ait  $r$  istatistiği değerini ise 0.70 olarak hesaplamışlardır.

Örneklerden de görüleceği üzere sadece SDB haritaları değil sonar yöntemiyle ölçülen batimetrik haritalarda yaz aylarında üretilmektedir. Bunun sebebi yaz aylarında akımların debisi dolayısıyla rezervuara taşınan sediment miktarı düşmektedir. Optik bir yöntem kullanan SDB haritaları gibi ses dalgalarını kullanan sonar yöntemi de suyun bulanıklığından etkilenmektedir. Sonar yönteminde bulanıklıktan kaynaklı hataları giderebilmek için her ölçümden önce sudan örnek alınmakta ve ses hızını ölçen aletler yardımıyla bulunan değer sonar aletine girilmektedir. Böylece sonar ölçümleri daha hassas olmaktadır.

Bu çalışmada Ağustos-Eylül 2019 tarihleri arasında sonar yöntemiyle üretilen Seyhan Barajı batimetrik haritası ile 14 Ağustos 2024 tarihli hiperspektral EnMAP uydu verisiyle üretilen SDB haritası karşılaştırılmıştır. İki verinin de yaz aylarında olmasından dolayı çalışma sonuçlarına bulanıklığın etkisinin en az olduğu düşünülmektedir. Ayrıca regresyon katsayılarının üretildiği kalibrasyon noktalarının sayısının 26935 olması, bulanıklıktan kaynaklı olarak derinliği yanlış hesaplanan pikselleri elemine edebilecektir.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada, iki yıldır operasyonel olarak görevde olan hiperspektral EnMAP uydu verisi ve yedi farklı yöntem (ICA1, ICA2, ICA3, PCA1, PCA2, PCA3 ve LRT) kullanılarak elde edilen SDB haritaları ile sonar yöntemiyle ölçülen gerçek batimetrik harita arasındaki korelasyon araştırılmıştır. SDB haritaları, üretilmesi tecrübe ve özel ölçüm aletleri gerektiren batimetrik harita yapımına daha hızlı ve ekonomik bir alternatif yaklaşım olarak günümüzde tercih edilmektedir. Uydu teknolojilerindeki gelişmeler ve özellikle uydu üzerinde bulunan sensörlerin gelişmesiyle daha hassas SDB haritaları üretilmektedir.

Seyhan Barajı rezervuarında yapılan çalışma sonucunda,  $r$  istatistiği açısından en iyi sonuçları 0.811 ile PCA1 ve 0.790 ile LRT yöntemi, ME istatistiği sonuçları açısından -11.822 ile ICA2 ve -12.027 ile LRT, PB istatistiği sonuçları açısından -113.907 ile ICA2 ve -96.640 ile LRT istatistikleri verdiği görülmüştür. Analiz sonucu çıkan değerler  $r$  istatistiği açısından anlamlı görülse de ME ve PB istatistikleri sonuçları açısından anlamlı bulunmamıştır. Ayrıca tahminlerin standart hataları hesaplanmış ve en iyi sonucun 0.102 ile LRT yöntemi olduğu görülmüştür. ICA, PCA ve LRT analizi sonuçları

ve tahminin standart hataları incelendiğinde LRT yönteminin öne çıktığı görülmüştür.

Ayrıca beşer metre derinlik farkı ile çalışma 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 ve 25-31 m olmak üzere 6 ayrı sınıfta tekrar analiz edilmiş olup en iyi sonuçların 15-20 m arasında, en zayıf sonuçların ise 0-5 m arasında aldığı görülmüştür. Sığ sularda sonuçların zayıf çıkmasının sebebi olarak SDB haritalarının en zayıf noktası olan bulanıklık olduğu tahmin edilmektedir. Ayrıca 6 ayrı derinlikte en başarılı yöntemlerin sırasıyla PCA1 ve LRT yöntemleri olduğu, en zayıf yöntemin ise uzak ara ICA3 yöntemi olduğu görülmüştür.

Çalışma sonucundan hiperspektral EnMAP uydusunun SDB harita üretiminde de kullanılabilmesi düşünülmektedir. Ayrıca SDB haritalarının üretilmesi aşamasında çalışma alanındaki ortalama derinliğe göre en uygun yöntemin seçimi konusunda karar vericileri bilgilendireceği sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Akgül, M.A., Dağdeviren, M., Biroğlu, İ. (2018). Çok Zamanlı Uydu Görüntüleri Kullanılarak Uydu-Kaynaklı Batimetri. DSİ Teknik Bülten, Sayı:127, Ocak 2018, Sayfa:14-27.
- Akgül, M.A., Yurtal, R. (2023). Seyhan Baraj Gölünde Askıda Sedimentin Alansal Dağılımının ve Zamansal Değişiminin Uzaktan Algılama ile Belirlenmesi. Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 47(2), 103-118. <https://doi.org/10.24232/jmd.1311124>.
- Akgül, M.A. (2024). Comparison of Bathymetric Maps of a Dam Reservoir Produced by Empirical Methods from Satellite Images with Different Spatial Resolutions with In-Situ Data. J Indian Soc Remote Sens 52, 257–269. <https://doi.org/10.1007/s12524-024-01824-2>.
- Akgül, M.A., Güvel, Ş.P., Aksu, H. (2024). Sedimentation Analysis on Seyhan Dam Reservoir Using Long Term Bathymetry Data, Journal of Engineering Sciences and Design, 12(1), 16-33. <https://doi.org/10.21923/jesd.1353462>.
- Bachmann, M., Alonso, K., Carmona, E., et al., (2021). Analysis-ready data from hyperspectral sensors—the design of the EnMAP CARD4L-SR data product. Remote Sens. 13, 4536. <https://doi.org/10.3390/RS13224536>.
- Bernstein, L.S., Adler-Golden, S.M., Sundberg, R.L., Levine, R.Y., Perkins, T.C., Berk, A. (2005). Validation of the QUick Atmospheric Correction (QUAC) algorithm for VNIR-SWIR multi- and hyperspectral imagery. SPIE, Proceedings, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XI. Vol. 5806, pp. 668-678. <https://doi.org/10.1117/12.603359>.
- Caballero, I., Stumpf, R.P. (2023). Confronting turbidity, the major challenge for satellite-derived coastal bathymetry. The Science of the total environment, 870, 161898. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161898>.
- Canty, J.M. (2014). Image Analysis, Classification and Change Detection in Remote Sensing, with Algorithms for ENVI/IDL and Python, Third Edition. CRC Press.
- Chang, C.I. (2003). Unconstrained Mixed Pixel Classification: Least-Squares Subspace Projection. In: Hyperspectral Imaging. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9170-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9170-6_8).
- Darama, Y., Selek, Z., Selek, B., Akgül, M.A., Dağdeviren, M. (2019). Determination of sediment deposition of Hasanlar Dam using bathymetric and remote sensing studies. Nat Hazards 97, 211–227. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03635-y>.
- DSİ (2014). Dams of Turkey, International Commission on Large Dams Turkish National Committee (TRCOLD), Dams of Turkey: Seyhan Dam. State Hydraulic Works (DSİ), Ankara, Türkiye.



- DSİ (2019). Adana-Seyhan Barajı Hidrografik Harita Yapımı İşi. Yağmur Harita –Kaya Mühendislik ortaklığı, Ankara, Türkiye.
- Erkinbaev, C., Derksen, K., Paliwal, J., (2019). Single kernel wheat hardness estimation using near infrared hyperspectral imaging. *Infrared Phys. Technol.* 98, 250–255.
- ESRI (2011). ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- Fakıoğlu, M. (2005). Seyhan Barajı Hidrografik Harita Alımı Değerlendirilmesi ve Sonuçları. TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası ve İTÜ Jeodezi ve Fotogrametri Müh.Bölümü, 2. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu Bildiriler Kitabı, İstanbul.
- Gupta, H.V., Sorooshian S., and Yapo, P.O. (1999). Status Of Automatic Calibration For Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration, *Journal of Hydrologic Engineering.* 4(2), 135-143. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4:2\(135\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135))
- Güvel, Ş.P., Akgül, M.A., Yurtal, R. (2021). Investigation of sediment accumulation in Berdan Dam Reservoir using bathymetric measurements and Sentinel-2 Data. *Arab J Geosci* 14, 2723. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09089-6>.
- Hyvarinen, A. (1999). Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis, *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 10, no. 3, pp. 626-634.
- Hyvarinen, A., & Oja, E. (2000). Independent component analysis: algorithms and applications. *Neural networks : the official journal of the International Neural Network Society*, 13 4-5, 411-30 .
- Huizingh, E. (2007). *Applied Statistics with SPSS*. SAGE Publications Ltd, London. <https://doi.org/10.4135/9781446249390>.
- IECO (1966). Water Resources Development Ceyhan Basin Projects, Seyhan Basin Projects, Berdan Project, Develi Project, Amik Project, Master Plan Report. (in Turkish)
- Kwon, J., Shin, H., Kim, D., Lee, H., Bouk, J., Kim, J., & Kim, T. (2024). Estimation of shallow bathymetry using Sentinel-2 satellite data and random forest machine learning: a case study for Cheonsuman, Hallim, and Samcheok Coastal Seas. *Journal of Applied Remote Sensing*, 18, 014522. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.18.014522>.
- Le Quilleuc, A., Collin, A., Jasinski, M.F., Devillers, R. (2022). Very High-Resolution Satellite-Derived Bathymetry and Habitat Mapping Using Pleiades-1 and ICESat-2. *Remote Sens.* 2022, 14, 133. <https://doi.org/10.3390/rs14010133>.
- Lyzenga, D.R. (1978). Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features. *Applied Optics*, 17(3), pp.379-383.
- Mateo-Pérez, V., Corral-Bobadilla, M., Ortega-Fernández, F., Vergara-González, E.P. (2020). Port Bathymetry Mapping Using Support Vector Machine Technique and Sentinel-2 Satellite Imagery. *Remote Sens.* 2020, 12, 2069. <https://doi.org/10.3390/rs12132069>.
- Mudiyanselage, S.S.J.D., Abd-Elrahman, A., Wilkinson, B., & Lecours, V. (2022). Satellite-derived bathymetry using machine learning and optimal Sentinel-2 imagery in South-West Florida coastal waters. *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 1143–1158. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2100597>.
- NASA, (2024). Catalog of Spaceborne Imaging, NASA Space Science Data Coordinated Archive (NSSDC), NASA Goddard Space Flight Center (GSFC), <https://nssdc.gsfc.nasa.gov/>, Erişim Tarihi: 01.07.2024.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Models 1. A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology* 10(3), 282-290.
- NV5 (2024a). Independent Components Analysis, <https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/IndependentComponentsAnalysis.html>. Date of access: 01.07.2024.

- NV5 (2024b). Principal Components Analysis, <https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/PrincipalComponentAnalysis.html>, Date of access: 01.07.2024.
- Pacheco, A., Horta, J., Loureiro, C., Ferreira, O. (2015). Retrieval of nearshore bathymetry from Landsat 8 images: A tool for coastal monitoring in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*. Volume: 159, Page: 102-116. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.004>.
- Raschka, S., Mirjalili, V. (2017). *Python Machine Learning*. Packt Publishing Ltd, Birmingham, UK.
- Richards, J.A. (1993). *Remote Sensing Digital Image Analysis*, 2nd ed. Springer Verlag, 1993.
- Pohl, C., & van Genderen, J. (2016). *Remote Sensing Image Fusion: A Practical Guide* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315370101>.
- Rojas-Moraleda, R., Valous, N.A., Gowen, et al., (2017). A frame-based ANN for classification of hyperspectral images: assessment of mechanical damage in mushrooms. *Neural Comput. Appl.* 28, 969–981.
- Saha, D., & Manickavasagan, A. (2021). Machine learning techniques for analysis of hyperspectral images to determine quality of food products: A review. *Current research in food science*, 4, 28–44. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.01.002>.
- Said, N.M., Mahmud, M.R., Hasan, R.C. (2017). Satellite-Derived Bathymetry: Accuracy Assessment on Depths Derivation Algorithm for Shallow Water Area, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4/W5, 159-164, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W5-159-2017>.
- Schowengerdt, R.A. (1997). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*, 2nd ed. Academic Press, 1997.
- Smith, F.G.F., Hess, M.L. (2017). Optimization of Multi-date Strategies for Calculating Bathymetry Using Multispectral Imagery. *Imaging and Geospatial Technology Forum (IGTF 2017)*. Baltimore, Maryland, USA. 12 - 16 March 2017.
- Snyder, L.P., Nyberg, J., Smith, S.M., Pe'eri, S., Madore, B., Rogers, J., Lowell, J., DeAngelis, R. (2016). Chart Adequacy Evaluation of the Coastal Water of Haiti Using Satellite-Derived Bathymetry. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Ocean Survey (NOS), Silver Spring, MD.
- Storch, T., Honold, H.-P., Chabrilat, S., et al. (2023). The EnMAP imaging spectroscopy mission towards operations. *Remote Sensing of Environment*, 294, 113632. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113632>. ISSN 0034-4257.
- Stumpf, R.P., Holderied, K., Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, volume. 48(1, part 2), pages. 547-556.
- Tang, K.K.W., Pradhan, B. (2015). Converting Digital Number into Bathymetric Depth: A Case Study over Coastal and Shallow Water of Langkawi Island, Malaysia. *FIG Working Week 2015*, (May 2015), 14
- Tang, K.K.W., Mahmud, M.R. (2021). The Accuracy of Satellite Derived Bathymetry in Coastal and Shallow Water Zone. *International Journal of Built Environment and Sustainability*, 8(3), 1–8. <https://doi.org/10.11113/ijbes.v8.n3.681>.
- Tharwat, A. (2021). “Independent component analysis: An introduction”, *Applied Computing and Informatics*, Vol. 17 No. 2, pp. 222-249. <https://doi.org/10.1016/j.aci.2018.08.006>.
- Van Liew, M.W., Arnold, J.G., and Garbrecht, J.D. (2003). Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Trans. ASAE* 46(6): 1539-1551.
- Wenzl, M. (2018). Bathymetry estimates and bottom classification using hyperspectral data in the baltic sea. Available at: <https://elib.dlr.de/126033/> (Accessed December 28, 2022).