

DOI: 10.26650/JGEOG2022-1099122

**COĞRAFYA DERGİSİ**  
**JOURNAL OF GEOGRAPHY**  
 2022, (45)

<https://iupress.istanbul.edu.tr/en/journal/jgeography/home>


# Atikhisar Baraj Gölü Batimetrisinin Landsat-5 TM Uydu Görüntüsünden Stumpf Algoritması Kullanılarak Belirlenmesi

## *Determining Atikhisar Reservoir's Bathymetry from Landsat-5 TM Satellite Images Using the Stumpf Algorithm*

Derya ÖZTÜRK<sup>1</sup> <sup>1</sup>Doç. Dr., Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

ORCID: D.Ö. 0000-0002-0684-3127

### ÖZ

Siğ sular için batimetrisinin belirlenmesi; kıyı bölgeleri, akarsu havzaları ve su kaynaklarının yönetimi açısından önemlidir. Ancak batimetrik verilerin toplanmasındaki ekonomik ve uygulama zorlukları batimetriye dayalı çalışmalarını da zorlaştırmaktadır. Bu zorlukların üstesinden gelmek için son yıllarda siğ sular için batimetrik haritalamada alternatif bir yaklaşım olarak uzaktan algılama teknolojisinin kullanımı üzerinde çalışmalar yoğunlaşmaktadır. Bu çalışmada Atikhisar Baraj Gölünün Sayısal Batimetrik Modelinin (SBM) belirlenmesinde ücretsiz ve açık bir veri olan Landsat-5 TM uydu görüntüsü kullanılmıştır. Baraj göl alanının belirlenmesinde NDWI (Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi) ve MNDWI (Modifiye Edilmiş Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi) su indeksleri, batimetrik haritalamada Stumpf algoritması uygulanmıştır. Beş farklı alıştırma referans nokta kümesi için Landsat-5 TM uydu görüntüsünün Mavi/Yeşil log-oran değerleri ve 1/5000 ölçekli sayısal batimetrik haritadan elde edilen değerler kullanılarak oluşturulan doğrusal regresyon denklemleri ile uydu görüntüsü tabanlı SBM'ler elde edilmiştir. SBM'lerin test verileriyle karşılaştırılması sonucunda karesel ortalama hata (KOH) değerleri hesaplanmıştır. En iyi sonuç veren model için regresyon belirleme katsayısı ( $R^2$ ) 0,701 ve KOH 2,1 m olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, Landsat görüntülerinden düşük maliyet ve kolay veri işleme ile baraj göllerinde ön inceleme ve genel değerlendirme amaçlı batimetrik harita üretim potansiyelini ortaya koymuştur.

**Anahtar kelimeler:** Batimetri, Stumpf Algoritması, Uzaktan Algılama

### ABSTRACT

Determining the bathymetry of shallow waters is important for managing coastal areas, river basins, and water resources. However, economic and practical difficulties in collecting bathymetric data cause disruptions in bathymetric studies. To overcome these challenges, a recent focus has involved the use of remote sensing technology as an alternative approach to the bathymetric mapping of shallow waters. This study uses Landsat-5 TM satellite imagery, which is free and open data, to determine the digital bathymetric model (DBM) of Atikhisar Reservoir. The study also uses the Normalized Difference Water Index (NDWI) and Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) to determine the reservoir's surface area and the Stumpf algorithm to perform the bathymetric mapping. Satellite image-based DBMs were obtained using the linear regression equations created from the blue/green log-ratio values from the Landsat-5 TM satellite image and the values obtained from a 1/5000 scale digital bathymetric map for five different training reference point sets. The root mean square error (RMSE) values were calculated by comparing the DBMs with the test data. The model with the best results showed the regression determination coefficient ( $R^2$ ) to be 0.701 and the RMSE to be 2.1 m. These results reveal the potential of low-cost bathymetric map production for preliminary investigation and general evaluation in reservoirs with easy data processing from Landsat images.

**Keywords:** Bathymetry, Stumpf algorithm, Remote Sensing

Başvuru/Submitted: 05.04.2022 • Revizyon Talebi/Revision Requested: 08.06.2022 • Son Revizyon/Last Revision Received: 16.06.2022 •

Kabul/Accepted: 25.07.2022



**Sorumlu yazar/Corresponding author:** Derya ÖZTÜRK / dozturk@omu.edu.tr

**Atıf/Citation:** Ozturk, D. (2022). Atikhisar Baraj Gölü batimetrisinin Landsat-5 TM uydu görüntüsünden stumpf algoritması kullanılarak belirlenmesi. *Coğrafya Dergisi*, 45, 97-110. <https://doi.org/10.26650/JGEOG2022-1099122>



## EXTENDED ABSTRACT

Bathymetric data for shallow waters are important for spatial planning and research on obtaining information about water depths and underwater topography in coastal areas of oceans and seas and in streams and lakes. Due to bathymetric data collection being difficult, time-consuming, and costly, the use of new technologies that provide quick economic results for bathymetric mapping has become increasingly common. This study created the digital bathymetric model (DBM) of Atikhisar Reservoir based on the Stumpf algorithm using Landsat-5 TM multispectral data from August 15, 2008 to test whether Landsat-5 TM images are suitable data sources for the bathymetric mapping of reservoirs.

The study first processed the image, rectifying the Landsat-5 TM image using land reference points from a 1/5000 scale bathymetric map. The root mean square error (RMSE) was kept below 0.5 pixels during the rectification process. The nearest neighbor algorithm was applied to preserve the original pixel values during the resampling phase of the rectification process. After rectification, a radiometric calibration of the image was carried out, and the digital pixel values of the bands were converted to top-of-atmosphere (TOA) reflection values. The dark object subtraction (DOS) model was applied to the data that had been converted to TOA reflectance values for atmospheric correction.

The water-covered area (the reservoir) was identified by integrating the Normalized Difference Water Index (NDWI) and Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI). The Stumpf algorithm was applied using the blue and green bands of the Landsat-5 TM satellite image of the reservoir. The Stumpf algorithm uses an equation based on the ratio of the two bands to derive water depth based on the principle that water has different absorption properties at different bands. The Stumpf algorithm requires reference points of known depth to scale the ratio to the proper depth. This study obtained five different group training reference points by forming the length and cross-sections of the reservoir area. The training reference points were created as a point data layer in the Geographical Information Systems (GIS) environment according to x, y position values, and the actual depth values and satellite image-based log-ratio values were added to the database as attributes by overlaying the 1/5000 scale digital bathymetric map with the Stumpf log-ratio image. Linear regression coefficients were generated using depth and log-ratio values for training reference points. According to the regression coefficients for the five different sample sets, depth values were obtained for the whole reservoir area, and DBMs were created. The coefficients of determination ( $R^2$ ) were calculated to validate the regression models. Additionally, RMSEs were calculated using 125 test points that had not been used during the training phase to evaluate the accuracy of the DBMs. The model that gave the best results was calculated to have an  $R^2$  value of 0.701 and RMSE of 2.1 m. To examine the extent to which the accuracy obtained from the study meets the International Hydrographic Organization (IHO) standards, the total vertical uncertainty (TVU) was calculated as 1.1 m at 20 m depths.

The study results reveal potential to exist for using Landsat satellite images to determine bathymetry in shallow reservoirs. However, because the accuracy level did not meet IHO standards, this procedure should be used as a preliminary investigation and evaluation tool prior to time-consuming and costly high-resolution surveys of reservoir areas. This study's model can also be used to monitor large changes over a long time.

As a result, the DBMs derived from the Landsat satellite image using the Stumpf algorithm are promising for shallow waters provided that the models have been validated using accurate ground truth data. Developing countries in particular can use this as an alternative to on-site depth measurement techniques that require intensive labor and time for areas where bathymetric data are unavailable, incomplete, or costly to obtain and the accuracy level is sufficient.

## 1. GİRİŞ

Batimetri; okyanusların, denizlerin, akarsuların ve göllerin sualtı topoğrafyasıdır. Sığ sular için batimetrik veriler özellikle kıyı bölgeleri, akarsu havzaları ve su kaynaklarının yönetimi ve mekânsal planlama açısından oldukça önemlidir (Hell vd., 2012). Su altı topoğrafyasının izlenmesi, sediment birikimi ve hareketlerinin takibi, kıyı erozyonu, iklim değişikliklerinin etkilerinin incelenmesi ve su seviyesi değişimlerinin takibi gibi birçok konuda batimetrik veriye gereksinim duyulmaktadır (Setiawan, Adawiah, Marini ve Winarso, 2016; Rossi, Mammì ve Pranzini, 2018; Turoğlu, 2019). Ancak güncel batimetrik verinin sürekli ve sistematik olarak toplanmasında ekonomik ve uygulama açısından kısıtların olması batimetrik değişimin takibine bağlı çalışmaları zorlaştırmaktadır (Trimble ve Houser, 2014; Trimble, Houser, Brander ve Chirico, 2015; Geyman ve Maloof, 2019; Kasvi, Salmela, Lotsari, Kumpula ve Lane, 2019).

Su derinliğinin ölçülmesinde ip iskandili, iskandil latası gibi klasik yöntemler çok zaman alıcı ve yorucu işlemlerdir (Elhassan, 2015). Deniz taşıma monte edilmiş yüksek çözünürlüklü veri sağlayan yandan taramalı SONAR (SOund NAVigation and Ranging) sistemleri derin suların ölçümü için tasarlandığından, bu teknikle sığ sularda batimetrinin ölçülmesi zordur ve ayrıca yüksek maliyetli bir teknolojidir (Geyman ve Maloof, 2019; Kasvi vd., 2019). Son yıllarda geliştirilen ve SONAR’la donatılmış uzaktan kumandalı sistemler sığ sularda kullanım için uygun olabilmektedir. Ancak bu sistemlerin batarya süreleri geniş alanların batimetrisinin çıkarılması için önemli bir sorun teşkil etmektedir (Flener vd., 2015; Kasvi vd., 2019). Kıyı ve sualtı araştırmaları için geliştirilen Batimetrik LIDAR (Light Detection and Ranging), elektromanyetik spektrumun yeşil bölgesinde çalışan, lazer tabanlı bir sistemdir ve geniş alanların hızlı araştırılmasına olanak tanır (Kasvi vd., 2019). Uçak, helikopter veya İnsansız Hava Araçlarına (İHA) monte edilen Batimetrik LIDAR’ların pahalı bir teknoloji olması batimetrik harita üretiminde yaygın kullanımını engellemektedir (Forfinski-Sarkozi ve Parrish, 2016; Geyman ve Maloof, 2019; Kasvi vd., 2019). Su üstü fotogrametrisi de, batimetrik haritalama için bir alternatif sunmaktadır (Shintani ve Fonstad, 2017). Ancak, bu yöntem uçaklara veya helikoptere monte edilmiş fotogrametrik kameralarla görüntü elde etmeyi gerektirdiğinden, Batimetrik LIDAR gibi pahalı bir teknolojidir. Bununla birlikte, fotogrametrik olarak kalibre edilmiş sensörlerle donatılmış ucuz İHA’ların (döner kanatlı veya sabit kanatlı) artan kullanılabilirliği ve kalibre edilmemiş sensörlerin kalibrasyonunu kolaylaştıran çok görüntülü stereo fotogrametrideki gelişmelerin ((özellikle Hareket İle Nesne Oluşturma (Structure from Motion: SfM))

ardından, fotogrametrik yaklaşımlar sığ sular için batimetrik ölçümlerde giderek daha fazla kullanılmaktadır (Kasvi vd., 2019). Ancak bu yöntemin de en önemli sınırlaması sadece tabanın görülebileceği derecede berrak ve durgun sığ sularda kullanılabilmesidir (Dietrich, 2017; Shintani ve Fonstad, 2017). Bu değerlendirmelere göre batimetrik model geliştirilmesinin önündeki mevcut engeller temel olarak sık (tekrarlı veri edinimi için) uygulamanın zorluğu, yüksek maliyet ve işgücüdür (Geyman ve Maloof, 2019; Kasvi vd., 2019).

Sığ sular için batimetrinin mevcut teknolojiler ile elde edilmesi uzun süren ve yüksek maliyetli bir işlem olduğundan son yıllarda birçok çalışmada uydu görüntülerinden fiziksel ve ampirik yöntemlerle batimetrinin elde edilmesi konusunda araştırmalar yapılmıştır (Lyzenga, 1978, 1985; Bierwirth, Lee ve Burne, 1993; Di Kaichang, Wei ve Wenyu, 1999; Stumpf, Holderied ve Sinclair, 2003; Mishra, Narumalanii, Lawson ve Rundquist, 2004; Lyzenga, Malinas ve Tanis, 2006; Minghelli-Roman, Goreac, Mathieu, Spigai ve Gouton, 2009; Huang, Wu, Yang, Liang ve Zhang, 2013; Eugenio, Marcello ve Martin, 2015; Kerr ve Purkis, 2018; Parente ve Pepe, 2018; Caballero ve Stumpf, 2019). Yapılan araştırmalar sığ sular için multispektral uydu görüntülerinden “Spektral Derinlik (Spectral Depth)” tekniğine dayanan batimetrik veri üretiminin; yüksek zamansal çözünürlükleri ve hidrografik gemilerle erişilemeyen bölgeler de dâhil olmak üzere geniş kapsama alanları nedeniyle SONAR, İHA fotogrametrisi ve LIDAR’dan türetilmiş verilere temel bir tamamlayıcı oluşturabileceğini ve Sayısal Batimetrik Model (SBM) üretiminin verimli ve uygun maliyetli bir yolunu sunabilme potansiyelinin olduğunu ortaya koymuştur (Parente ve Pepe, 2018; Radermacher, Schipper ve Reniers, 2018; Geyman ve Maloof, 2019). Gerçekleştirilen çalışmalarda 30 m ve daha sığ sular için batimetrinin multispektral uydu görüntülerinden elde edilebileceği ve batimetrik araştırmalar için kıyasal mavi, mavi, yeşil ve sarı spektral bantların etkili olduğu belirlenmiştir (Trimble ve Houser, 2014; Ehses ve Rooney, 2015; Trimble vd., 2015; Kerr ve Purkis, 2018; Parente ve Pepe, 2018; Geyman ve Maloof, 2019; Wei vd., 2020).

Suyla kaplı alanlar için uydu görüntü verisi; atmosfer, su berraklığı, derinlik zayıflaması, dip yansımaları, asılı materyale bağlı saçılma gibi faktörler tarafından etkilenen yansıyan ışık miktarıdır. Elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinde suyun geçirgenliği, dip yansıtım oranı ve asılı materyalin saçılması farklıdır (Jawak, Vadlamani ve Luis, 2015; Shah, Deshmukh ve Sinha, 2020). Bu nedenle, su derinliği tahmininin doğruluğunu artırmak için, çok bantlı veriler kullanılır. İdeal koşullarda, homojen bir atmosfer, benzer dalga durumu, benzer

su özelliği ve homojen dip özelliği varsayımları altında, su derinliği bir uydu görüntüsünden elde edilebilir. Uydu sensörü, su sütununa girdikten sonra dipten yansıyan görünür ışığı algılar. Beer Yasasına göre ışık, su sütununda derinlikle eksponansiyel olarak zayıflar (Jawak vd., 2015). Uzaktan algılama ile gözlemlenen yansıma ( $r_{rs}$ ) ile su derinliği ( $z$ ) ve dip (taban) yansıması ( $r_{rs}^{dp}$ ) arasındaki ilişki Denklem 1’de tanımlandığı şekildedir (Kerr ve Purkis, 2018).

$$r_{rs} \approx \frac{\rho_b}{\pi} (e^{-2kz}) + r_{rs}^{dp} (1 - e^{-2kz}) \quad (1)$$

Bu denklemde suyla kaplı alanlar için yüzey altı uzaktan algılama yansıması ( $r_{rs}$ ); dip (taban) yansıması ( $r_{rs}^{dp}$ ) ve optik olarak derin suyun yüzey altı uzaktan algılama yansımasının (su sütunu yansıması) ( $\rho_b$ ) bir kombinasyonu olarak modellenmiştir. Aşağıya doğru ve yukarı doğru yükselen dağınık ışın zayıflama katsayıları eşit varsayılarak ( $r_{rs}$ ) değeri yaklaşık olarak belirlenebilir. Bağlıdaki ( $k$ ) değeri dağınık ışın zayıflama katsayısıdır (Bierwirth vd., 1993; Kerr ve Purkis, 2018). Bu bağıntı, çok bantlı bir uydu görüntüsünden su derinliğini elde etmek için birçok yaklaşımın temelini oluşturmaktadır (Kerr ve Purkis, 2018).

Su derinliğini elde etme yaklaşımları temel olarak fizik temelli ve istatistik temelli yaklaşımlar olarak iki gruba ayrılabilir. Fizik temelli yaklaşımlarda su derinliği, Denklem 1’in ters çevrilmesi veya klorofil konsantrasyonu, gelbstoff konsantrasyonu, geri saçılma katsayıları gibi ileri model girdilerinin optimizasyonu yoluyla çözülebilir (Kerr ve Purkis, 2018). Ancak bu yaklaşımlar multispektral verilerden ziyade hiperspektral verilere daha sık uygulanır. Çünkü hiperspektral veriler artan spektral bant sayısından dolayı daha yüksek spektral çözünürlüğe ve dolayısıyla ek spektral bilgiye sahiptir. Fizik temelli yaklaşımların gücü, yer gerçeği verileri olmadan spektral gözlemleri etkileyen fiziksel parametrelerin tahminine izin vermeleridir. Ancak, denklemin karmaşıklığı, çözümün bulunması açısından önemli bir problemdir. Çünkü her piksel için su derinliği, taban yansıması, su sütunu yansıması ve dağınık ışın zayıflatma katsayısı dâhil olmak üzere birçok bilinmeyen parametre vardır. Su sütunu yansıması ve dağınık ışın zayıflatma katsayısı için makul değer varsayımları yapılabilsede su derinliği ve taban yansıması her bir piksel için bilinmeyenler olup bu iki değer için çoklu kombinasyonu su yüzeyinde aynı uzaktan algılama yansımasına yol açabileceğinden her iki parametrenin aynı anda çözülmesi oldukça zordur (Lyzenga vd., 2006; Kerr ve Purkis, 2018). Yer gerçeği bilgisinin bulunmadığı veya sınırlı olduğu uzak yerler için derinlik bilgileri fizik temelli modellerle elde edilebilir (Kerr ve Purkis, 2018).

İkinci grup olan istatistiksel temelli yaklaşımlar, su derinliğini spektral gözlemlerle ilişkilendiren istatistiksel modellerin tahmin katsayılarını elde etmek için su derinliğinin saha gözlemlerini kullanır (Lyzenga, 1985; Stumpf vd., 2003; Lyzenga vd., 2006). Bu yaklaşımların güçlü yanları, istatistiksel regresyon kullanarak Denklem 1’deki bilinmeyen parametrelerin çözümündeki zorluklardan kaçınmaları ve uygulanmalarının fizik tabanlı yaklaşımlardan daha basit olmasıdır (Stumpf vd., 2003). İstatistiksel yaklaşımların temel sınırlaması, kalibrasyonu gerçekleştirmek için saha gözlemlerinin-gerçek verilerin (belirli kesitler için) gerekli olmasıdır (Kerr ve Purkis, 2018). Ayrıca derinlik sınırına göre alanın maskelenmesi gerekmektedir. Derinliğe göre sınır belirlenmesi için farklı kesitlerde ölçümler gerekir. Bu şekilde, model ve gerçek derinlik arasındaki korelasyonu gözlemlemek mümkündür. Saha verileri gereksinimi, SONAR, Batimetrik LIDAR vb. tekniklerle ölçüm yapılmasını gerektirir. Model doğruluğu açısından yer gerçeği verilerinin doğru elde edilmesi önemlidir (Parente ve Pepe, 2018). Uydu görüntülerini kullanarak batimetrimin elde edilmesinde, tahmini derinliğin doğruluğunu bozabilecek su berraklığı, bulut örtüsü, güneş ışığı gibi çevresel koşulların dikkate alınması gerekir (Jagalingam, Akshaya ve Hegde, 2015).

Uzaktan algılama, uydu görüntülerinin geniş alanları kapsamaması, düşük maliyet ve tekrarlanabilirlik nedeniyle batimetrik haritalama için en umut verici alternatif araçlardan biri olarak kabul edilebilir (Jagalingam vd., 2015). Son yıllarda, Ikonos, RapidEye, Quickbird ve WorldView-2 başta olmak üzere batimetrik araştırmalar için etkin olan kıyasal mavi, mavi, yeşil ve sarı spektral bantlara sahip çok sayıda yüksek mekânsal çözünürlüklü multispektral uydu görüntüsü temin edilebilmektedir (Trimble ve Houser, 2014; Ehses ve Rooney, 2015; Trimble vd., 2015; Kerr ve Purkis, 2018). Ancak bu görüntülerin ticari olarak tedarik edilmesi gerekmektedir. Buna karşın, açık veri özelliğinde ve ücretsiz erişilebilen uydu görüntüleri de batimetrik haritalama için alternatif olarak değerlendirilmekte ve sığ sular için etkinliği araştırılmaktadır (Setiawan, 2013; Jagalingam vd., 2015; Setiawan vd., 2016; Yunus, Dou, Song ve Avtar, 2019; Saeed, Abdelrahman ve Negm, 2021; Uzakara ve Demir, 2021; Vargas vd., 2021). Bu kapsamda erişilebilen orta çözünürlüklü multispektral görüntülerden Sentinel-2 2015 yılından itibaren veri sağlamaktadır (ESA, 2015). Landsat görüntüleri ise Sentinel-2’ye göre daha düşük çözünürlükte olmasına karşın tarih olarak 1972’ye kadar uzanır ve Landsat-4’ten itibaren 16 günlük tekrar ziyaret süresiyle uzun bir periyot için arşiv verileri sağlar (Liu ve Trinder, 2018).



Bu çalışmada; Atikhisar Baraj Gölünde istatistiksel temelli bir yöntem olan Stumpf algoritması kullanılarak ücretsiz ve açık veri Landsat-5 TM uydu görüntülerinden SBM üretilmiş ve doğruluk değerlendirmesi gerçekleştirilmiş, Landsat görüntülerinin sığ göl alanlarında batimetrik harita üretiminde kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

## 2. ÇALIŞMA ALANI: ATIKHİSAR BARAJ GÖLÜ

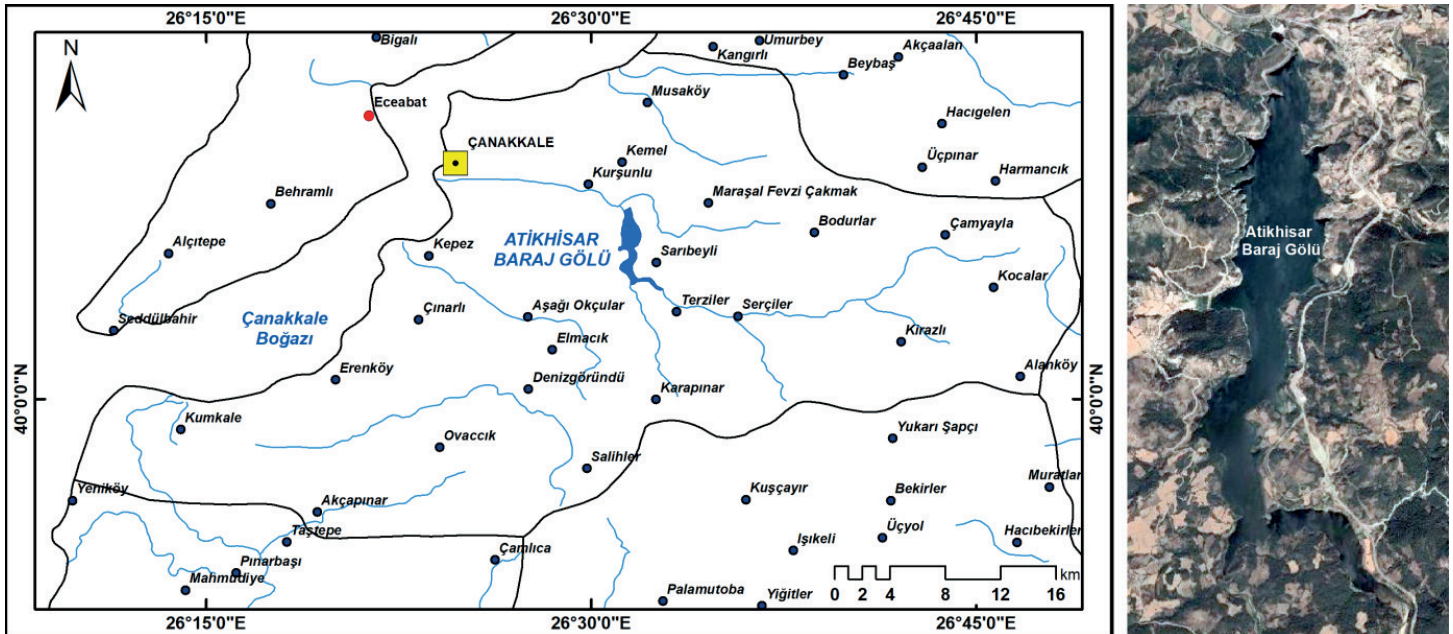
Barajlar, içme ve kullanma suyu temini, sulama, enerji üretimi ve taşkın kontrolü amacıyla inşa edilen su yapılarıdır. Baraj hacminin ölü hacim olarak adlandırılan kısmı baraj havzasından gelmesi beklenen sedimentin depolanması için ayrılmakta, aktif hacim olarak adlandırılan diğer kısmı su depolamak için kullanılmaktadır (Çelik vd., 2012). Ölü hacim, rezervuarın sediment ile dolarak barajın ekonomik ömrü içerisinde görevini yapamaz hale gelmesini önlemek üzere ayrılan bir hacimdir (DSİ, 2010). Baraj göllerindeki su miktarındaki değişim ve sediment birikimi belirli periyotlarla yapılan batimetrik haritalar ile tespit edilebilmektedir (Akgül, Dağdeviren ve Büroğlu, 2018). Bu çalışmada Landsat uydu görüntülerinin baraj göl alanlarında batimetrisinin belirlenmesindeki etkinliğinin araştırılması amacıyla çalışma alanı olarak Atikhisar Baraj Gölü (Şekil 1) seçilmiştir.

Atikhisar Baraj Gölü,  $26^{\circ}31'2''$ - $26^{\circ}33'10''$  doğu meridyenleri ve  $40^{\circ}3'50''$ - $40^{\circ}7'36''$  kuzey paralelleri arasında yer almaktadır. Atikhisar Barajı, Sarıçay Havzası'nda ve Çanakkale Merkez İlçe

sınırları içerisinde Sarıçay (Kocaçay) üzerine 1968-1975 yılları arasında inşa edilmiştir (Koca, 2005; Özelkan ve Karaman, 2018). Atikhisar Kalesi'nin hemen güneyinde Çanakkale-Çan karayolunun da geçtiği Sarıçay Vadisi'nde yer almaktadır (Koca, 2005). Sulama, taşkın koruma ve içme suyu amaçlı bir baraj olup, normal su kotunda alanı  $3 \text{ km}^2$ , hacmi  $40 \text{ hm}^3$  ve maksimum su kotunda alanı  $3,6 \text{ km}^2$  ve hacmi  $52,5 \text{ hm}^3$ 'tür (Koca, 2005; Özelkan ve Karaman, 2018; Özelkan, 2019). Çanakkale şehir merkezinin Sarıçay taşkınlarından korunması, Çanakkale, Kalabaklı ve Özbek Ovasında sulu tarım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesi ve Çanakkale merkezinin içme suyu gereksinimlerinin sağlanması amacıyla inşa edilen barajdan aynı zamanda balık üretmek için de yararlanılmaktadır (Koca, 2005; Özelkan ve Karaman, 2018).

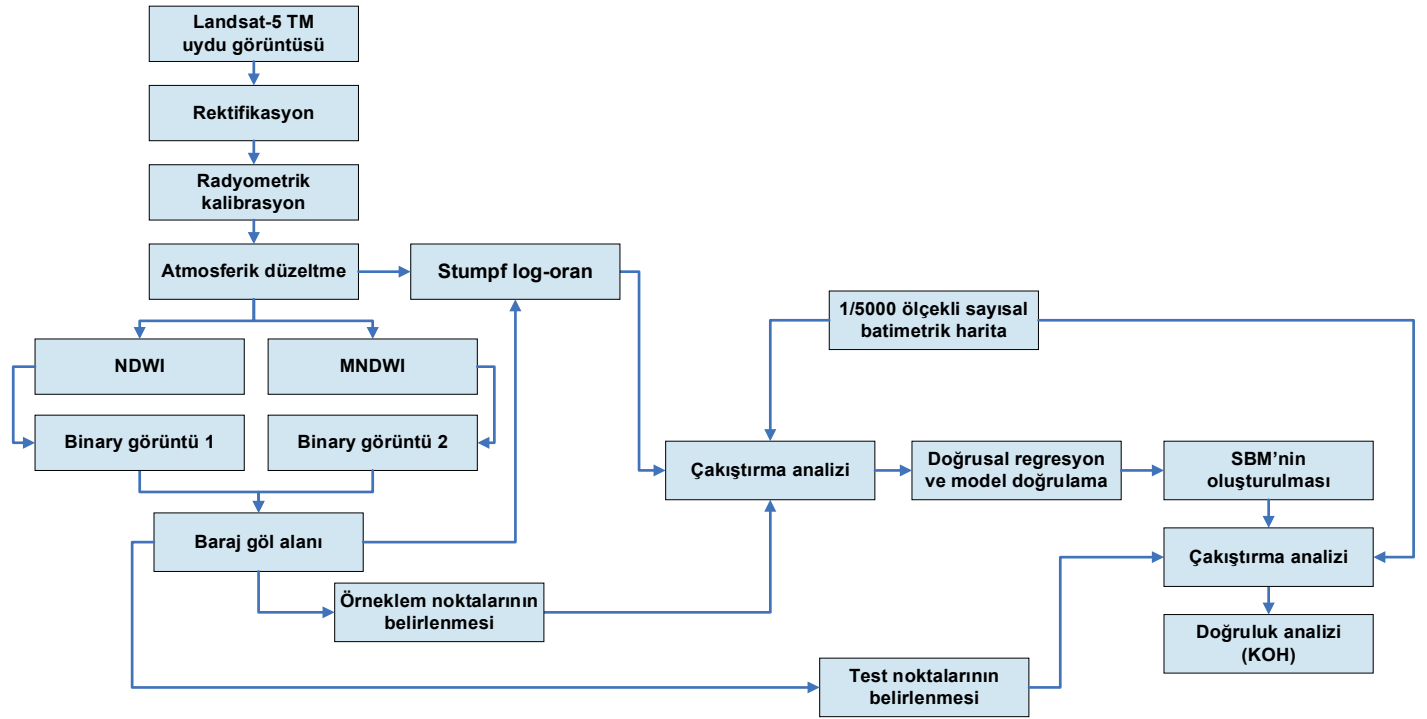
## 3. YÖNTEM

Landsat-5 TM uydu görüntülerinden Atikhisar Barajı SBM'nin elde edilmesinde Stumpf yöntemi kullanılmıştır. Stumpf algoritmasında, su derinliğini üretmek için suyun farklı bantlarda farklı absorpsiyon özelliğinde olması ilkesine bağlı olarak temel olarak iki bantın oranlanmasına dayalı bir denklem kullanılır. Stumpf algoritması, oranı derinliğe ölçeklemek için derinliği bilinen referans noktaları gerektirir. Çalışmada Landsat-5 TM uydu görüntülerinden SBM'nin elde edilmesinde izlenen ana işlem adımları Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 1: Çalışma alanı: Atikhisar Baraj Gölü.

Figure 1: Study area: Atikhisar Dam Lake.



**Şekil 2:** Çalışmanın ana işlem adımları.

**Figure 2:** The main steps of the study.

Uydu görüntülerinden batimetrimin elde edilmesinde eş zamanlı saha ölçümleri gerektiğinden, DSİ Genel Müdürlüğünden temin edilen ve Ağustos 2008 tarihinde batimetrik ölçümleri gerçekleştirilmiş olan 1/5000 ölçekli sayısal batimetrik haritanın üretim tarihine en yakın uydu görüntüsü olan 15/08/2008 tarihli Landsat-5 TM uydu görüntüsünün kullanılmasına karar verilmiştir. Uydu görüntüsü USGS Earth Explorer veri portalından (USGS, 2022a) ücretsiz olarak indirilmiştir. Landsat-5 TM, 6 multispektral bant ve 1 termal bant olmak üzere 7 bantlı bir uydu görüntüsüdür. Multispektral bantlar için piksel boyutu 30 m'dir (USGS, 2022b). Landsat-5 TM görüntüsünde önışlemenin ardından Normalleştirilmiş Fark Su İndeksi (Normalized Difference Water Index: NDWI) ve Modifiye Edilmiş Normalleştirilmiş Fark Su İndeksinden (Modified Normalized Difference Water Index: MNDWI) yararlanılarak suyla kaplı alanlar (baraj göl alanı) belirlenmiştir. Baraj göl alanında Landsat-5 TM uydu görüntüsünün Mavi ve Yeşil bantları kullanılarak Stumpf algoritması uygulanmıştır. Doğrusal regresyon katsayılarının oluşturulması için örneklem referans noktaları kullanılmıştır. Bu amaçla baraj göl alanında boykesit ve enkesitler çıkarılarak beş farklı grup örneklem referans noktası elde edilmiştir. Örneklem referans noktaları x, y konum değerlerine göre Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) ortamında nokta veri katmanı olarak oluşturulmuş ve 1/5000 ölçekli sayısal batimetrik harita ve Stumpf log-oran görüntüsüyle karşılaştırılarak gerçek batimetrik değerler ve uydu görüntüsü tabanlı log-oran

değerleri öznitelik olarak veritabanına eklenmiştir. Örneklem referans noktaları için derinlik değerleri ve log-oran değerleri kullanılarak doğrusal regresyon katsayıları oluşturulmuştur. Regresyon katsayılarına göre tüm görüntü için derinlik değerleri oluşturularak beş farklı örneklem ile SBM'ler elde edilmiştir. Regresyon modellerini doğrulamak için belirleme katsayıları ( $R^2$ ) hesaplanmıştır. Ayrıca SBM'lerin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla örneklem aşamasında kullanılmayan 125 adet test noktası kullanılarak karesel ortalama hatalar (KOH) hesaplanmıştır.

### 3.1. Görüntü Önışleme: Rektifikasyon, Radyometrik Kalibrasyon ve Atmosferik Düzeltme

Bir uydu görüntüsünden suyun derinliğinin elde edilmesi temel olarak görüntüdeki dijital değerlerin (Digital number: DN) çeşitli yöntemler kullanılarak fiziksel bilgilere dönüştürülmesini kapsamaktadır. Bu bağlamda rektifikasyon işleminde orijinal piksel değerlerinin korunması ve görüntülerde radyometrik kalibrasyon ve atmosferik düzeltme işlemlerinin uygulanması uydu görüntülerinden batimetrik verilerin elde edilmesinde gerçek derinlik verileriyle ilişkilendirilecek piksel değerlerinin doğruluğunun artırılması açısından büyük bir önem taşımaktadır (Parente ve Pepe, 2018). Bu çalışmada rektifiye edilmiş olarak temin edilen Landsat-5 TM görüntüsünde (USGS, 2022a) piksel değerleri batimetrik verilerle eşleştirileceği için batimetrik

haritayla geometrik olarak daha uyumlu hale getirmek amacıyla 1/5000 ölçekli batimetrik haritadan kara referans noktaları kullanılarak uydu görüntüsünde yeniden rektifiye (Everitt, Yang, Sriharan ve Judd, 2008) işlemi uygulanmıştır. Rektifikasyon işlemi KOH'nın 0,5 pikselin altında tutulmasına özen gösterilmiştir. Rektifikasyon işlemi yeniden örnekleme aşamasında orijinal piksel değerlerini koruyabilmek için En Yakın Komşu algoritması uygulanmıştır. Rektifikasyon işleminden sonra gerçek yüzey yansımaya değerlerinin elde edilmesi için radyometrik kalibrasyon ve atmosferik düzeltme gerçekleştirilmiştir. Radyometrik kalibrasyon sensör tarafından kaydedilen değerlerin fiziksel değerlere dönüştürülmesi (Wang, Thome, Lockwood ve Wenny, 2022), atmosferik düzeltme ise yüzeyden yansıyan radyasyonla birlikte atmosfer tarafından saçılan radyasyonu da içeren değerlerden atmosferik etkilerin giderilerek gerçek yüzey yansımaya değerlerinin elde edilmesi işlemidir (Cetin, Musaoglu ve Kocal, 2017). Radyometrik kalibrasyon ile bantlardaki piksel dijital değerleri atmosfer üstü (Top of Atmosphere: TOA) yansımaya değerlerine dönüştürülmüş ve TOA yansımaya değerlerine dönüştürülen verilere atmosferik düzeltme için Koyu Nesne Çıkarımı (Dark Object Subtraction: DOS) modeli uygulanmıştır.

### 3.1.1. TOA Yansımasına Dönüşüm

Landsat-5 TM sensörleri, yansıyan güneş enerjisini yakalar, bu verileri parlaklığa dönüştürür, ardından bu verileri 0 ila 255 arasında bir 8-bit dijital değere yeniden ölçeklendirir. Bu dijital değerler iki aşamalı bir süreç kullanılarak TOA yansımaya değerine dönüştürülür. İlk adımda, TOA radyans değerlerine dönüşüm, ikinci adımda radyans değerlerinden TOA yansımaya değerlerine dönüşüm gerçekleştirilir (Ghebreamlak, Tanakamaru, Tada, Ahmed Adam ve Elamin, 2018). Bu işlem, sensör farklılıklarından, Dünya-Güneş mesafesinden ve Güneş zenit açısından kaynaklanan görüntüler arası farklılıkları büyük ölçüde ortadan kaldırır (Bruce ve Hilbert, 2006; Chander, Markham ve Helder, 2009). Bu çalışmada Landsat-5 TM görüntü değerleri, MTL metaveri dosyasındaki bilgiler ve Landsat-5 TM sensörü parametreleri (Chander ve Markham, 2003) kullanılarak TOA yansımasına dönüştürülmüştür (Denklem 2 ve 3) (Chander vd., 2009):

$$L_{\lambda} = \left( \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN_{\lambda} \quad (2)$$

Burada;

$L_{\lambda}$ :  $\lambda$  spektral bandı için spektral radyans (W/(m<sup>2</sup>  $\mu$ m sr)),

$LMAX_{\lambda}$ :  $Q_{calmax}$ 'a ölçeklenen spektral radyans (W/(m<sup>2</sup>  $\mu$ m sr)),

$LMIN_{\lambda}$ :  $Q_{calmin}$ 'e ölçeklenen spektral radyans (W/(m<sup>2</sup>  $\mu$ m sr)),

$Q_{cal}$ : Kuantize-kalibre edilmiş piksel dijital değeri (DN),

$Q_{calmin}$ :  $LMIN_{\lambda}$ 'ya karşılık gelen minimum kuantize-kalibre edilmiş piksel dijital değeri (DN=0),

$Q_{calmax}$ :  $LMAX_{\lambda}$ 'ya karşılık gelen maksimum kuantize-kalibre edilmiş piksel dijital değeridir (DN=255).

$$\rho(TOA)_{\lambda} = \frac{L_{\lambda} d^2 \pi}{ESUN_{\lambda} \cos \theta_s} \quad (3)$$

Burada;

$\rho(TOA)_{\lambda}$ :  $\lambda$  spektral bandı için TOA yansımaya değeri,

$L_{\lambda}$ :  $\lambda$  spektral bandı için spektral radyans (W/(m<sup>2</sup>  $\mu$ m sr)),

$d$ : Astronomik birimlerde Dünya-Güneş mesafesi,

$ESUN_{\lambda}$ : Güneş eksoatmosferik ışınımı (W/(m<sup>2</sup>  $\mu$ m)),

$\theta_s$ : Solar zenit açısıdır (derece).

### 3.1.2. Koyu Nesne Çıkarımı

Koyu nesne çıkarımı yöntemi (Chavez, 1996), yaygın olarak kullanılan atmosferik düzeltme yöntemlerinden birisidir (Song, Woodcock, Seto, Lenney ve Macomber, 2001; Mancino, Nolè, Ripullone ve Ferrara, 2014; Wicaksono ve Hafizt, 2018). Görüntü tabanlı bir prosedürdür ve saha ölçümleri gerektirmediğinden basit ve uygulaması kolaydır. Koyu nesne çıkarımı ile atmosferik düzeltme işlemi, Denklem 4 ve 5 (Green, Mumby, Edwards ve Clark, 2000; Setiawan vd., 2016; Wicaksono ve Hafizt, 2018) takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

$$R_i = R_{TOAi} - R_{\rho i} \quad (4)$$

$$R_{\rho i} = \text{Mean}_{\text{dark target } i} - (2 \times \text{Std}_{\text{dark target } i}) \quad (5)$$

Denklem 4 ve 5'te  $R_i$ , atmosferik olarak düzeltilmiş  $i$  bandı değeri;  $R_{TOAi}$ ,  $i$  bandında TOA yansımaya değeri;  $R_{\rho i}$ , koyu hedeften oluşturulan atmosferik path-radyans değeri;  $\text{Mean}_{\text{dark target } i}$ ,  $i$  bandının seçilen koyu hedef piksellerinin ortalama yansımaya değeri;  $\text{Std}_{\text{dark target } i}$ ,  $i$  bandının seçilen koyu hedef piksellerinin standart sapmasıdır.

### 3.2. Uydu Görüntüsünden Baraj Göl Alanının Elde Edilmesi

Landsat-5 TM uydu görüntülerinden suyla kaplı alanların belirlenmesinde NDWI (McFeeters, 1996) (Denklem 6) ve MNDWI (Xu, 2006) (Denklem 7) su indeksleri kullanılmıştır. İndeks görüntülerinde Doğal Aralıklı Sınıflandırma (Jenks Natural Breaks) algoritması uygulanarak görüntü kara ve su

olarak ayrılmıştır. Kara için 0 ve su için 1 değeri kodlanarak binary görüntüler elde edilmiştir. Binary kodlanmış NDWI ve MNDWI oran görüntüleri “mantıksal ve operatörü” ile birleştirilerek (oran görüntüleri çarpılmış) sonuç görüntü elde edilmiştir. Bu şekilde NDWI ve MNDWI görüntüleri entegre edilerek sonuç hassasiyet artırılmıştır. Baraj göl alanı, Landsat-5 TM uydu görüntüsünün piksel boyutuna bağlı olarak 30 m piksel boyutlu görüntü verisi olarak üretilmiştir.

$$NDWI = (Green - NIR)/(Green + NIR) \quad (6)$$

$$MNDWI = (Green - MIR)/(Green + MIR) \quad (7)$$

Denklem 6 ve 7’de Green, yeşil batta yansıtım değeri; NIR, yakın kızılötesi bantta yansıtım değeri; MIR, orta kızılötesi bantta yansıtım değeridir.

### 3.3. Örneklem ve Test Referans Noktalarının Belirlenmesi

Baraj göl alanının 30 m piksel boyutlu görüntü verisinde örneklem ve test referans noktaları belirlenmiştir. Örneklem referans noktaları beş farklı şekilde düzenlenmiştir. 1. örneklem setinde 5 piksel (150 m) aralıklarla boykesit ve 3 piksel (90 m aralıklarla) enkesit oluşturularak toplam 130 adet nokta, 2. örneklem setinde 7 piksel (210 m) aralıklarla boykesit ve 4 piksel (120 m) aralıklarla enkesit oluşturularak toplam 69 adet nokta, 3. örneklem setinde 10 piksel (300 m) aralıklarla boykesit ve 6 piksel (180 m) aralıklarla enkesit oluşturularak toplam 33 adet nokta, 4. örneklem setinde 10 piksel (300 m) aralıklarla boykesit ve 9 piksel (270 m) aralıklarla enkesit oluşturularak toplam 22 nokta ve 5. örneklem setinde 15 piksel (450 m) aralıklarla boykesit ve 9 piksel (270 m) aralıklarla enkesit oluşturularak toplam 16 nokta belirlenmiştir. Örneklem setlerinde kullanılmayan 125 nokta (5 piksel (150 m) aralıklarla boykesit ve 3 piksel (90 m aralıklarla) enkesit oluşturularak) test noktası olarak belirlenmiştir.

### 3.4. Uydu Görüntüsünden SBM’nin Elde Edilmesi

Su derinliğini belirlemek için uydu görüntüsünün kullanılma olasılığı üzerine ilk çalışma Lyzenga (1978) tarafından gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen ampirik yöntemde su derinliği, homojen su özellikleri hipotezi ve Beer Yasasına dayanarak, doğrusal bir denklemle belirlenmektedir (Parente ve Pepe, 2018). Lyzenga’nın (1978) standart doğrusal algoritması, yansıtım değeri ve su derinliği arasında log-doğrusal bir ilişki olduğunu varsayar (Geyman ve Maloof, 2019). Yöntemin önemli bir sınırlaması, su derinliği hesabında taban tipindeki

değişikliklerin albedoları önemli ölçüde değiştireceğinin hesaba katılmamasıdır (Stumpf vd., 2003; Parente ve Pepe, 2018; Geyman ve Maloof, 2019). Bu sınırlamaların üstesinden gelebilen bir yöntem Stumpf vd. (2003) tarafından geliştirilen log-oran algoritmasıdır (Denklem 8). Bu log-oran algoritmasıyla derinlik bilgisi ( $Z_m$ ) taban yansımından bağımsız olarak elde edilebilir (Parente ve Pepe, 2018).

$$Z_m = m \frac{\log R(\lambda_i)}{\log R(\lambda_j)} + c \quad (8)$$

Burada;  $R(\lambda_i)$  ve  $R(\lambda_j)$  sırasıyla i ve j bantlarındaki yansıma değerleri,  $Z_m$  modellenen derinlik bilgisidir. Bu yöntem kullanılarak, iki bantın yansıma oranı ve yer gerçeği derinlik bilgileri arasında doğrusal bir regresyon geliştirilebilir (Geyman ve Maloof, 2019). Denklem 8’de m ve c örneklem referans noktalarının gerçek derinlik ve log-oran değerleri kullanılarak hesaplanan doğrusal regresyon katsayılarıdır.

Batimetrik veri elde etme amacıyla kullanılan en etkin bant oranları (Kıyasal mavi/Yeşil), (Kıyasal mavi/Sarı) ve (Mavi/Yeşil)’dir (Parente ve Pepe, 2018; Geyman ve Maloof, 2019; Rossi, Mammi ve Pelliccia, 2020). Bu çalışmada SBM’yi elde etmek için Stumpf algoritmasının uygulanmasında Landsat-5 TM uydu görüntülerinin bantları dikkate alınarak (Mavi/Yeşil) oranı kullanılmıştır.

Örneklem referans noktaları 1/5000 ölçekli sayısal batimetrik harita ve Stumpf log-oran görüntüleriyle karşılaştırılarak tüm örneklem setlerinde her nokta için gerçek batimetrik değerler ve log-oran değerleri elde edilmiş ve batimetrik değerler bağımlı değişken, log-oran değerleri bağımsız değişken olmak üzere doğrusal regresyon denklemleri oluşturulmuştur.

### 3.5. SBM’nin Doğruluk Değerlendirmesi

Çalışmada gerçekleştirilen regresyon, belirleme katsayısı (coefficient of determination:  $R^2$ ) ile denetlenmiştir.  $R^2$  regresyonun kalitesi için temel ölçüt olup 0 ila 1 arasında değer alır (Renaud ve Victoria-Feser, 2010). Bu değer 1’e eşitse, regresyon çizgisinin verilere mükemmel şekilde uyduğu anlamına gelirken, değeri 0’a eşitse, veriler ilişkili değildir. Buna göre yüksek belirleme katsayısı, yer gerçeği verileri ile oluşturulan SBM arasında güçlü bir ilişki anlamına gelmektedir (Parente ve Pepe, 2018). Genel olarak  $R^2$  değeri 0,3’ten küçük ise çok zayıf etki, 0,3–0,5 aralığında ise zayıf veya düşük etki, 0,5–0,7 aralığında ise orta etki ve 0,7’den büyükse güçlü etki büyüklüğü olarak yorumlanır (Moore, Notz ve Flinger, 2013).



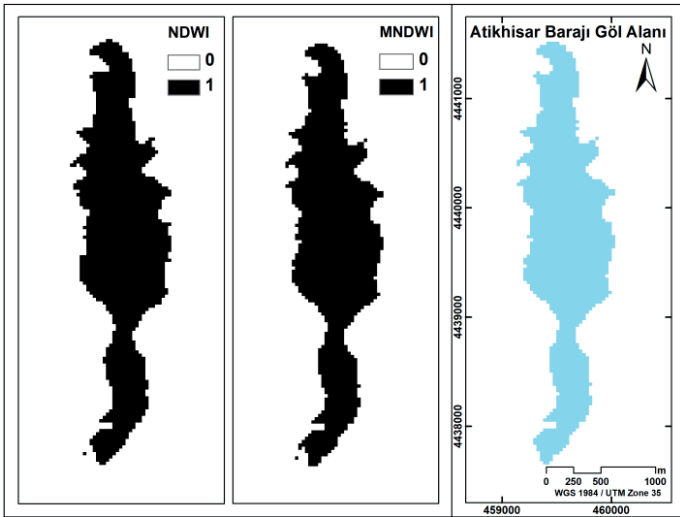
Oluşturulan SBM'nin gerçek verilere göre doğruluğu, KOH ve korelasyon gibi hata ölçütleri veya fark haritaları ile değerlendirilebilmektedir (Parente ve Pepe, 2018; Radermacher vd., 2018). Bu çalışmada elde edilen SBM'nin doğruluğunu belirlemek için, modellenen derinlikler ( $Z_m$ ) ile test referans noktalarının derinlikleri ( $Z_r$ ) arasındaki farklar ( $\Delta$ ) hesaplanıp nokta sayısına ( $n$ ) bağlı olarak Denklem 9'da belirtildiği şekilde KOH'lar hesaplanmıştır.

$$KOH = \sqrt{\frac{\sum(Z_m - Z_r)^2}{n}} \quad (9)$$

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Atıkhisar Barajı Göl Alanı

15/08/2008 tarihli Landsat-5 TM uydu görüntüsünde baraj göl alanı NDWI ve MNDWI su indekslerinin entegrasyonu ile belirlenmiştir (**Şekil 3**). Belirlenen baraj göl alanı 1,77 km<sup>2</sup>'dir. Baraj göl alanı sayısal batimetrik harita verisiyle karşılaştırıldığında yükseklik değerlerinin 35,0-55,2 m arasında olduğu belirlenmiştir. Buna göre maksimum derinlik 20,2 m'dir.

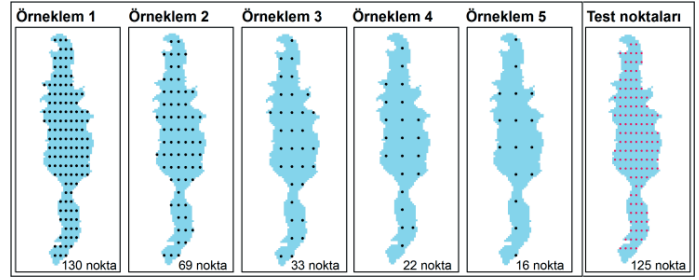


**Şekil 3:** NDWI ve MNDWI su indekslerinin entegrasyonu ile belirlenen baraj göl alanı.

**Figure 3:** The dam lake area determined by the integration of the NDWI and MNDWI.

### 4.2. Örneklem ve Test Referans Noktaları

Baraj göl alanının 30 m piksel boyutlu görüntü verisinde piksel merkezleri kullanılarak belirlenen beş farklı örneklem seti ve test referans noktaları **Şekil 4**'te gösterilmiştir.



**Şekil 4:** Örneklem ve test referans noktaları.  
**Figure 4:** Reference points of training and testing.

### 4.3. Stumpf Algoritmasına Dayalı SBM Sonuçları ve Doğruluk Değerlendirmesi

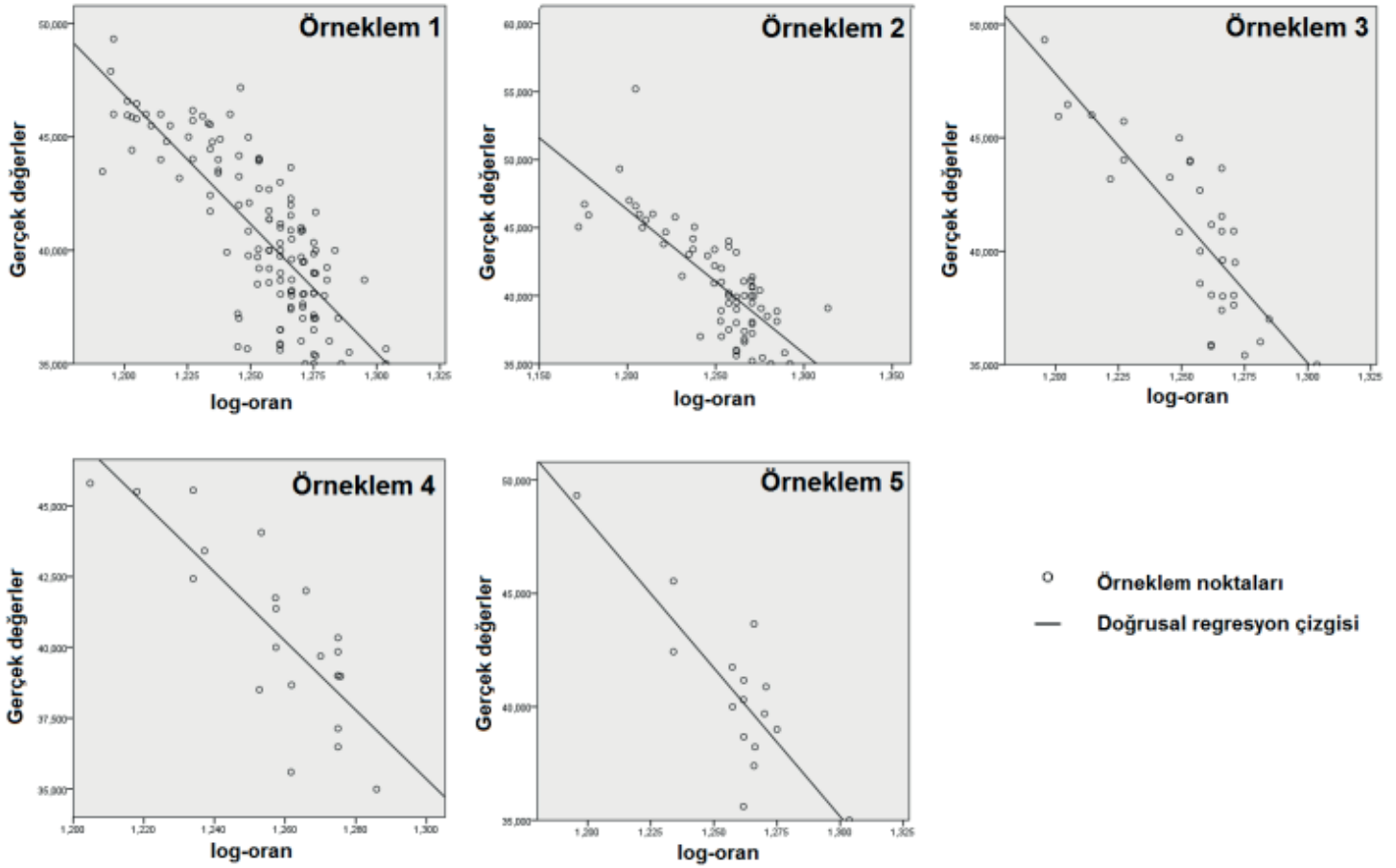
NDWI ve MNDWI indeks görüntülerinin entegrasyonu ile belirlenen baraj göl alanı sınırları içerisinde Stumpf yöntemi uygulanmıştır. Örneklem referans noktalarının CBS ortamında log-oran görüntüsü ve batimetrik harita ile karşılaştırılmasıyla her nokta için elde edilen log-oran ve batimetrik değerler kullanılarak uygulanan doğrusal regresyon sonucu (**Şekil 5**) elde edilen denklem katsayıları ve model uyumunu değerlendirmek için hesaplanan R<sup>2</sup> değerleri **Tablo 1**'de gösterilmiştir. R<sup>2</sup> değerleri 0,608–0,701 arasında değerler almıştır. R<sup>2</sup> değerleri tüm örneklem setleri için 0,6'nın üzerindedir. En iyi model uyumu 0,701 değeriyle örneklem 3 ve 5'ten oluşturulan modellerden elde edilmiştir. Moore vd. (2013) tarafından belirtilen R<sup>2</sup> değer aralıklarına göre örneklem 1, 2 ve 4 orta, örneklem 3 ve 5 ise güçlü etki büyüklüğüne sahiptir.

Regresyon katsayıları kullanılarak tüm baraj göl alanı için SBM'ler oluşturulmuştur. Modellerin doğruluğunu belirlemek için 125 adet test referans noktası kullanılarak KOH değerleri hesaplanmıştır (**Tablo 1**). SBM'den elde edilen model değeri ( $Z_m$ ) ve test referans noktalarının batimetrik değerleri ( $Z_r$ ) arasındaki farka dayalı olarak hesaplanan KOH'ların 2,1–2,3 m arasında değer aldığı belirlenmiştir. En düşük KOH değeri 2,1 m değeriyle örneklem 3'ten oluşturulan modelden elde edilmiştir.

**Tablo 1:** Regresyon katsayıları, R<sup>2</sup>, KOH.

**Table 1:** Regression coefficients, R<sup>2</sup>, RMSE.

Örneklem Seti	Regresyon Denklemi	R <sup>2</sup>	KOH (m)
Örneklem 1	$Z_m = 183,337 - 113,746 \log\text{-oran}$	0,620	2,2
Örneklem 2	$Z_m = 173,262 - 105,786 \log\text{-oran}$	0,608	2,2
Örneklem 3	$Z_m = 200,998 - 127,642 \log\text{-oran}$	0,701	2,1
Örneklem 4	$Z_m = 193,526 - 121,669 \log\text{-oran}$	0,659	2,2
Örneklem 5	$Z_m = 205,369 - 130,928 \log\text{-oran}$	0,701	2,3



Şekil 5: Doğrusal regresyon modelleri.

Figure 5: Linear regression models.

Bu değerlendirmelere göre en yüksek  $R^2$  ve en düşük KOH değerini veren örneklem 3 setine göre oluşturulan SBM, Atikhisar Baraj Gölünün SBM'si olarak belirlenmiştir (Şekil 6). Bu model, Atikhisar Baraj Gölünde batimetrik verilerin Landsat-5 TM görüntülerinden 2,1 m KOH ile türetilebileceğini göstermektedir. Atikhisar Baraj Gölünün uydu görüntüsünden türetilen SBM'ye göre yükseklik değerleri 30,6–53,8 arasında olup 1/5000 ölçekli sayısal batimetrik veriler ile uyumlu sonuç elde edilmiştir.

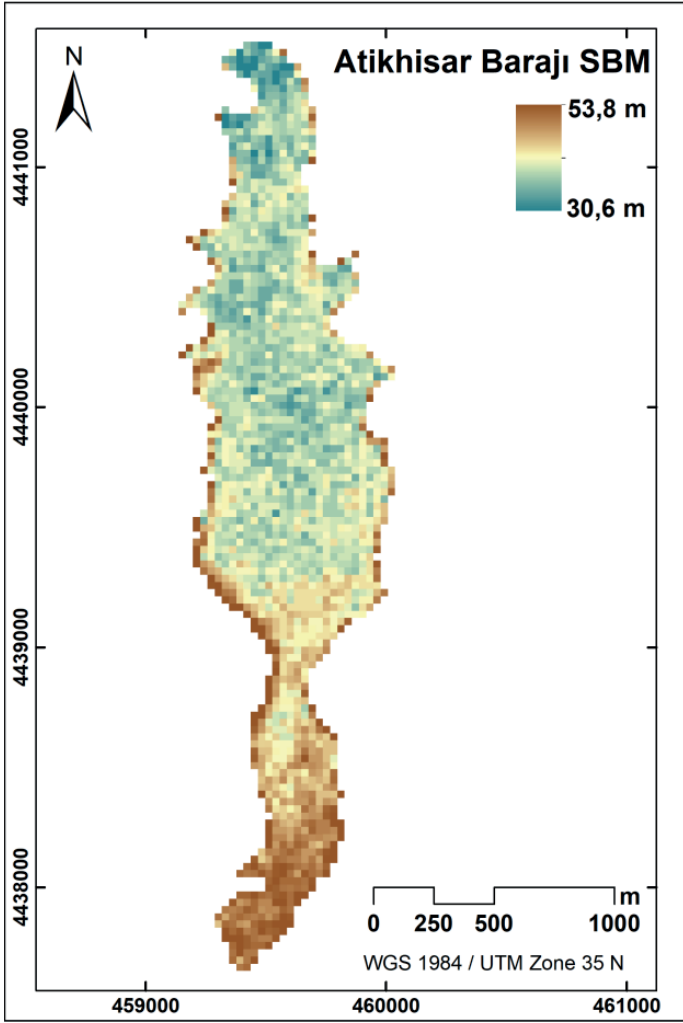
Çalışmadan elde edilen doğruluğun Uluslararası Hidrografi Teşkilatı (International Hydrographic Organization: IHO) standartlarını ne ölçüde karşıladığını irdelemek amacıyla 20 m derinlik baz alınarak Denklem 10'a göre toplam dikey belirsizlik (Total vertical uncertainty: TVU) hesaplanmıştır.

$$TVU(d) = \sqrt{a^2 + (b * d)^2} \quad (10)$$

Denklemden; a, belirsizliğin derinlikle değişmeyen kısmını, b, belirsizliğin derinlikle değişen kısmını temsil eden katsayı olup d ise derinliği ifade eder.

Bu çalışmada IHO S-44 Edition 6.0.0 belgesinde (IHO, 2020) su altı tabanının genel tanımının yeterli olduğu alanlar için katsayılar ( $a = 1,0$  m ve  $b = 0,023$ ) kullanılmış ve TVU değeri 1,1 m olarak belirlenmiştir. Landsat-5 TM uydu görüntüsünden elde edilen SBM'nin KOH'sı 2,1 m olduğundan IHO standartlarını sağlamadığı görülmektedir.

Diğer yandan, çalışmanın bulguları literatürde Landsat-5 TM ve aynı çözünürlüğe sahip Landsat-7 ETM+ ve Landsat-8 OLI uydu görüntülerinden Stumpf algoritmasıyla batimetrik modellemenin gerçekleştirildiği çalışmalarla karşılaştırıldığında benzer doğruluk düzeylerinin elde edildiği görülmüştür. Yapılan çalışmalarda  $R^2$  değeri 0,574 ile 0,955 arasında çeşitli doğruluk düzeyindedir. Setiawan (2013) Bali'de Menjangan adasında Landsat-7 ETM+ görüntülerinden 0,620  $R^2$  değeri ile, Jagalingam vd. (2015) Hindistan'da New Mangalore Limanında Landsat-8 OLI görüntülerinden 0,878  $R^2$  değeri ile, Setiawan vd. (2016) Endonezya-Jakarta'da Karang Lebar sularında Landsat-8 OLI görüntülerinden 0,712 değeri ile, Akgül vd. (2018) Seyhan Baraj Gölünde Landsat-8 OLI görüntülerinden 0,723 ile 0,955 arasında



**Şekil 6:** Atikhisar Baraj Gölünün SBM.

**Figure 6:** Atikhisar Dam Lake's DBM.

değişen  $R^2$  ve 1,6 ila 5,4 m arasında değişen KOH ile, Saeed vd. (2021) Mısır'da Safaga Limanında Landsat-8 OLI görüntülerinden 0,574  $R^2$  değeri ile batimetrik model üretmişlerdir.

Bu çalışmanın sonuçları, uydu görüntülerinden yakın kıyı/sığ alan batimetrisini istatistik temelli yaklaşımlarla inceleyen diğer çalışmalarda (Stumpf vd., 2003; Jagalingam vd., 2015; Trimble vd., 2015; Akgül vd., 2018; Parente ve Pepe, 2018; Caballero ve Stumpf, 2019; Saeed vd., 2021) olduğu gibi belirli kısıtlamaların olduğunu ortaya koymuştur. Uydu görüntülerinden batimetrisinin elde edilmesi referans verileri olmadan uygulanamamaktadır. Bu durum mutlaka yersel ölçümlerle desteklenmesi gerekliliğini doğurmaktadır. SBM'nin oluşturulması, örneklem referans noktalarının yoğunluğuna, doğruluğuna, kapsamına ve ayrıca örneklem alma şemasına (kesit noktalarının konumları) bağlıdır. Kısaca farklı örnekleme şemaları yöntemin sonuçlarını etkilemektedir. Ancak Brander ve

Cowell'e (2013) göre aynı durum herhangi bir konuda istatistiksel olarak türetilmiş herhangi bir tahmin için de geçerli olup uydu görüntülerinden batimetrisinin elde edilmesinde örnekleme şemalarına olan bu bağımlılık batimetrik modeli oluşturma yönteminin kesinliğini ve tekrarlanabilirliğini azaltmaz. Uydu görüntülerinden türetilen batimetrisinin performansını etkileyen diğer kısıtlayıcı unsur çevredir. Suyun berraklığı, ışığın suya nüfuzunu etkileyen önemli bir faktördür. Dolayısıyla uydu görüntülerinden batimetrisinin elde edilmesi berrak sulara kıyasla bulanık sulara uygulamayı kısıtlamaktadır (Saeed vd., 2021). Süspansediment miktarı batimetrik verinin doğruluğu üzerinde doğrudan etkili olduğundan (Akgül vd., 2018) süspansediment yoğunluğunun takibiyle batimetrik veri üretimi için daha uygun tarihler belirlenerek SBM doğruluğunun artırılabilir. Bu çalışma için bir diğer kısıtlayıcı unsur görüntünün mekânsal çözünürlüğüdür. Daha yüksek mekânsal çözünürlüklü görüntülerin kullanılması durumunda doğruluğunun da artması beklenebilir. Bununla birlikte literatürde mavi ve yeşil spektral bantların yanı sıra kıyasal mavi ve sarı bantların da batimetrik haritalamada etkinliği kanıtlandığından (Trimble ve Houser, 2014; Ehses ve Rooney, 2015; Trimble vd., 2015; Kerr ve Purkis, 2018; Parente ve Pepe, 2018; Geyman ve Maloof, 2019; Wei vd., 2020) bu bantlara sahip uydu görüntülerinin kullanılması durumunda farklı bantların log-oranları entegre edilerek sonuç doğruluğunun artırılması mümkün olabilecektir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sığ sular için batimetrik veriler, okyanusların ve denizlerin kıyı alanlarında, akarsularda ve göllerde su derinliği ve su altı topografyası hakkında bilgi edinilmesi ve mekânsal planlama ve araştırmalar için önemlidir. Batimetrik verilerin yersel ölçümlerle toplanması zor, zaman alıcı ve maliyetlidir. Buna karşın uzaktan algılama verileri nispeten düşük bir maliyetle elde edilir, geniş mekânsal kapsama alanına sahiptir ve zaman ve mekân kısıtlamaları yoktur. Bu nedenle batimetrik veri toplama yöntemlerinin birçok dezavantajının üstesinden gelecek hızlı ve ekonomik sonuçlar sağlayan uzaktan algılama teknolojisinin batimetrik haritalamada kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu kapsamda özellikle açık veri olarak ücretsiz temin edilen uydu görüntüleri düşük maliyetle batimetrik veri üretimi için önemli bir seçenek olarak kabul edilebilir. Şu anda küresel erişime açık multispektral veri kaynakları Landsat ve Sentinel-2'dir.

Bu çalışmada açık veri özelliğinde ve ücretsiz temin edilen Landsat görüntülerinin baraj göl alanlarında batimetrik haritalama için uygun bir veri kaynağı olup olmadığını test

etmek için Atıkhisar Baraj Gölü için 15/08/2008 tarihli Landsat-5 TM multispektral verilerinden Stumpf log-oran algoritmasına dayalı olarak SBM oluşturulmuştur. Çalışmadan elde edilen sonuçlar Landsat-5 TM uydu görüntülerinin sığ sulara sahip baraj göllerinde batimetrisinin belirlenmesinde kullanılabilme potansiyelini göstermiştir. Ancak sağlanan doğruluk düzeyi IHO standartlarını sağlamadığı için bu prosedürün baraj göl alanları için yüksek maliyet gerektiren yüksek çözünürlüklü araştırmalar yapılmadan önce bir ön inceleme ve değerlendirme aracı olarak kullanılmasının uygun olacağı düşünülmektedir. Ayrıca geniş arşiv verileriyle uzun zaman aralıklarında gerçekleşen büyük değişimleri izleme amaçlı da kullanılabilceği öngörülmektedir.

Sonuç olarak, Landsat-5 TM uydu görüntülerinden Stumpf algoritması ile türetilen batimetri modellemesinin, modelin doğru yer gerçeği verileri kullanılarak doğrulanması şartıyla sığ sular için umut verici olduğu görülmektedir. Buna göre Landsat-5 TM ile aynı çözünürlükte olan Landsat-7 ETM+ ve Landsat-8 OLI görüntüleri de önemli bir kaynak oluşturmaktadır. Landsat görüntüleri özellikle gelişmekte olan ülkelerde batimetrik verilerin mevcut olmadığı, eksik olduğu veya elde edilmesinin maliyetli olduğu alanlarda sağladığı doğruluk düzeyinin yeterli olacağı çalışmalar için yoğun işgücü ve zaman gerektiren yerinde derinlik ölçüm teknikleri yerine alternatif olarak kullanılabilir. İlave olarak, Landsat görüntülerine göre daha yüksek çözünürlüklü Sentinel-2 görüntüleri 2015 yılı ve sonrası için önemli bir potansiyel oluşturabilir. Ayrıca daha yüksek çözünürlüklü görüntülerin açık ve ücretsiz veri olarak temin edilebilmesi veya daha düşük maliyetlerle elde edilebilmesi durumunda uzaktan algılamanın sığ sular için SBM oluşturulmasında odak noktası olacağı ve yaygın uygulama alanı bulacağı düşünülmektedir.

**Hakem Değerlendirmesi:** Dış bağımsız.

**Çıkar Çatışması:** Yazar çıkar çatışması bildirmemiştir.

**Finansal Destek:** Yazar bu çalışma için finansal destek almadığını beyan etmiştir.

**Peer-review:** Externally peer-reviewed.

**Conflict of Interest:** The author has no conflict of interest to declare.

**Grant Support:** The author declared that this study has received no financial support.

## KAYNAKÇA/REFERENCES

Akgül, M. A., Dağdeviren, M. ve Biroğlu, İ. (2018). Çok zamanlı uydu görüntüleri kullanılarak uydu-kaynaklı batimetri. *DSİ Teknik Bülteni*, 127, 14–27.

Bierwirth, P. N., Lee, T. J., & Burne, R. V. (1993). Shallow sea-floor reflectance and water depth derived by unmixing multispectral imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59(3), 331–338.

Brander, R. W., & Cowell, P. J. (2003). A trend-surface technique for discrimination of surf-zone morphology: Rip current channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(8), 905–918. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.489>

Bruce, C. M., & Hilbert, D. W. (2006). Pre-processing methodology for application to Landsat TM/ETM+ imagery of the wet tropics. Research Report, Cooperative Research Centre for Tropical Rainforest Ecology and Management, James Cook University, Australia, 38 p.

Caballero, I., & Stumpf, R. P. (2019). Retrieval of nearshore bathymetry from Sentinel-2A and 2B satellites in South Florida coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 226(6), 106277. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106277>

Chander, G., & Markham, B. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(11), 2674–2677.

Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893–903. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>

Chavez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections - Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, 62(9), 1025–1036.

Cetin, M., Musaoglu, N., & Kocal, O. H. (2017). A comparison of atmospheric correction methods on hyperion imagery in forest areas. *Uludag University Journal of The Faculty of Engineering*, 22(1), 103–114. <http://dx.doi.org/10.17482/uumfd.308630>

Çelik, H. E., Şengönül, K., Akyüz, F., Altunel, O., Dağcı, M. ve Esin, A. İ. (2012). İstanbul'un içme suyu barajlarının sedimantasyon problemi ve çözüm önerileri: Alibey Barajı örneği. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 62(2), 113–127.

Di Kaichang, D. Q., Wei, C., & Wenyu, C. (1999). Shallow water depth extraction and chart production from TM images in Nansha Islands and nearby sea area. *Remote Sensing for Land & Resources*, 11(3), 59–64.

Dietrich, J. T. (2017). Bathymetric structure from motion: extracting shallow stream bathymetry from multiview stereo photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(2), 355–364. <http://dx.doi.org/10.1002/esp.4060>

DSİ (2010). DSİ Mühendislik Meslek Eğitimi, Cilt 2, Ankara.

Ehse, J. S., & Rooney, J. J. (June 2015). Depth Derivation Using Multispectral Worldview-2 Satellite Imagery. NOAA Technical Memorandum NMFS-PIFSC-46.

Elhassan I. (2015). Development of bathymetric techniques. *FIG Working Week 2015, From the Wisdom of the Ages to the Challenges of the Modern World*, Sofia, Bulgaria, 17–21 May 2015.

ESA, (2015). Sentinel-2 User Handbook. Retrieved from [https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/sentinel-2\\_user\\_handbook](https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/sentinel-2_user_handbook) (Last accessed: 15.06.2022)

Eugenio, F., Marcello, J., & Martin, J. (2015). High-resolution maps of bathymetry and benthic habitats in shallow-water environments using multispectral remote sensing imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(7), 3539–3549. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2014.2377300>



- Everitt, J. H., Yang, C., Sriharan, S., & Judd, F. W. (2008). Using high resolution satellite imagery to map black mangrove on the Texas Gulf Coast. *Journal of Coastal Research*, 24(6), 1582–1586. <http://dx.doi.org/10.2112/07-0987.1>
- Flener, C., Wang, Y., Laamanen, L., Kasvi, E., Vesakoski, J. M., & Alho, P. (2015). Empirical modeling of spatial 3D flow characteristics using a remote-controlled ADCP system: Monitoring a spring flood. *Water*, 7(1), 217–247. <http://dx.doi.org/10.3390/w7010217>
- Forfinski-Sarkozi, N. A., & Parrish, C. E. (2016). Analysis of MABEL bathymetry in Keweenaw bay and implications for ICESat-2 ATLAS. *Remote Sensing*, 8(9), 772. <http://dx.doi.org/10.3390/rs8090772>
- Geyman, E. C., & Maloof, A. C. (2019). A simple method for extracting water depth from multispectral satellite imagery in regions of variable bottom type. *Earth and Space Science*, 6(3), 527–537. <http://dx.doi.org/10.1029/2018EA000539>
- Ghebreamlak, A. Z., Tanakamaru, H., Tada, A., Ahmed Adam, B. M., & Elamin, K. A. (2018). Satellite-based mapping of cultivated area in Gash Delta Spate irrigation system, Sudan. *Remote Sensing*, 10(2), 186. <http://dx.doi.org/10.3390/rs10020186>
- Green, E., Mumby, P., Edwards, A., & Clark, C. (2000). Remote sensing: Handbook for tropical coastal management. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).
- Hell, B., Broman, B., Jakobsson, L., Jakobsson, M., Magnusson, Å., & Wiberg, P. (2012). The use of bathymetric data in society and science: A review from the Baltic Sea. *Ambio*, 41(2), 138–150. <http://dx.doi.org/10.1007/s13280-011-0192-y>
- Huang, W. Q., Wu, D., Yang, Y., Liang, Z. C., & Zhang, Y. Y. (2013). Multi-spectral remote sensing water depth retrieval technique in shallow sea. *Ocean Technology*, 32(2), 43–46.
- IHO (2020). International Hydrographic Organization Standards for Hydrographic Surveys (S-44 Edition 6.0.0).
- Jagalingam, P., Akshaya, B. J., & Hegde, A. V. (2015). Bathymetry mapping using Landsat 8 satellite imagery. *Procedia Engineering*, 116, 560–566. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.326>
- Jawak, S. D., Vadlamani, S. S., & Luis, A. J. (2015). A synoptic review on deriving bathymetry information using remote sensing technologies: models, methods and comparisons. *Advances in Remote Sensing*, 4(2), 147–162. <http://dx.doi.org/10.4236/ars.2015.42013>
- Kasvi, E., Salmela, J., Lotsari, E., Kumpula, T., & Lane, S. N. (2019). Comparison of remote sensing based approaches for mapping bathymetry of shallow, clear water rivers. *Geomorphology*, 333, 180–197. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.017>
- Kerr, J. M., & Purkis, S. (2018). An algorithm for optically-deriving water depth from multispectral imagery in coral reef landscapes in the absence of ground-truth data. *Remote Sensing of Environment*, 210, 307–324. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.024>
- Koca N. (2005). Atikhisar Barajı'nın (Çanakkale) çevresel ve ekonomik etkileri. *Doğu Coğrafya Dergisi*, 10(14), 209–233.
- Liu, Q., & Trinder, J. C. (2018). Sub-pixel technique for time series analysis of shoreline changes based on multispectral satellite imagery. In M. Marghany (Ed.), *Advanced Remote Sensing Technology for Synthetic Aperture Radar Applications, Tsunami Disasters, and Infrastructure*. IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.81789>
- Lyzenga, D. R. (1978). Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, 17(3), 379–383. <http://dx.doi.org/10.1364/AO.17.000379>
- Lyzenga, D. R. (1985). Shallow-water bathymetry using combined lidar and passive multispectral scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 6(1), 115–125. <http://dx.doi.org/10.1080/01431168508948428>
- Lyzenga, D. R., Malinas, N. P., & Tanis, F. J. (2006). Multispectral bathymetry using a simple physically based algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8), 2251–2259. <http://dx.doi.org/10.1109/TGRS.2006.872909>
- Mancino, G., Nolè, A., Ripullone, F., & Ferrara, A. (2014). Landsat TM imagery and NDVI differencing to detect vegetation change: assessing natural forest expansion in Basilicata, southern Italy. *iForest*, 7(2), 75–84. <http://dx.doi.org/10.3832/ifor0909-007>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425–1432. <http://dx.doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Minghelli-Roman, A., Goreac, A., Mathieu, S., Spigai, M., & Gouton, P. (2009). Comparison of bathymetric estimation using different satellite images in coastal sea waters. *International Journal of Remote Sensing*, 30(21), 5737–5750. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160902729580>
- Mishra, D., Narumalanii S., Lawson, M., & Rundquist, D. (2004). Bathymetric mapping using IKONOS multispectral data. *GIScience & Remote Sensing*, 41(4), 301–321. <http://dx.doi.org/10.2747/1548-1603.41.4.301>
- Moore, D. S., Notz, W. I., & Flinger, M. A. (2013). *The basic practice of statistics* (6th edition). New York: W. H. Freeman and Company.
- Özelkan, E. (2019). Uzaktan algılama ile belirlenen baraj gölü alanının zamansal değişiminin meteorolojik kuraklık ile değerlendirilmesi: Atikhisar barajı (Çanakkale) örneği. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 6(4), 904–916.
- Özelkan, E. ve Karaman, M. (2018). Baraj göllerindeki meteorolojik ve hidrolojik kuraklığın etkisinin çok zamanlı uydu görüntüleri ile analizi: Atikhisar Barajı (Çanakkale) örneği. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2), 1023–1037.
- Parente, C., & Pepe, M. (2018). Bathymetry from WorldView-3 satellite data using radiometric band ratio. *Acta Polytechnica*, 58(2), 109–117. <http://dx.doi.org/10.14311/AP.2018.58.0109>
- Radermacher, M., de Schipper, M. A., & Reniers, A. J. H. M. (2018). Sensitivity of rip current forecasts to errors in remotely-sensed bathymetry. *Coastal Engineering*, 135, 66–76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2018.01.007>
- Renaud, O., & Victoria-Feser, M. P. (2010). A robust coefficient of determination for regression. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 140(7), 1852–1862. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jspi.2010.01.008>

- Rossi, L., Mammi, I., & Pelliccia, F. (2020). UAV-Derived Multispectral Bathymetry. *Remote Sensing*, 12(23), 3897. <http://dx.doi.org/10.3390/rs12233897>
- Rossi, L., Mammi, I., & Pranzini, E. (2018). A comparison between UAV and high-resolution multispectral satellite images for bathymetry estimation. In G. Chirici & M. Gianinetto (Eds.), *Trends in Earth Observation: Earth Observation Advancements in a Changing World* (Vol 1, pp.143–146). Firenze, Italy.
- Saeed, R., Abdelrahman, S. M., & Negm, A. (2021). Satellite-derived bathymetry using Landsat-8 imagery for Safaga Coastal Zone, Egypt. *Acta Marisensis. Seria Technologica*, 18(1), 8–15.
- Setiawan, K. T., Adawiah, S. W., Marini, Y., & Winarso, G. (2016). Bathymetry data extraction analysis using Landsat 8 Data. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 13(2), 79–86.
- Setiawan, K. T. (2013). *Study of bathymetry map using Landsat ETM+ data - A case study at Menjangan Island, Bali* (MSc Thesis, Udayana University, Indonesia).
- Shah, A., Deshmukh, B., & Sinha, L. K. (2020). A review of approaches for water depth estimation with multispectral data. *World Water Policy*, 6, 152–167. <http://dx.doi.org/10.1002/wwp2.12029>
- Shintani, C., & Fonstad, M. A. (2017). Comparing remote-sensing techniques collecting bathymetric data from a gravel-bed river. *International Journal of Remote Sensing*, 38 (8-10), 2883–2902. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2017.1280636>
- Song, C., Woodcock, C. E., Seto, K. C., Lenney, M. P., & Macomber, S. A. (2001). Classification and change detection using Landsat TM data: When and how to correct atmospheric effect. *Remote Sensing of Environment*, 75, 230–244. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00169-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00169-3)
- Stumpf, R. P., Holderied, K., & Sinclair, M. (2003). Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types. *Limnology and Oceanography*, 48(1, part2), 547–556. [http://dx.doi.org/10.4319/lo.2003.48.1\\_part\\_2.0547](http://dx.doi.org/10.4319/lo.2003.48.1_part_2.0547)
- Trimble, S. M., & Houser, C. (2014). Mapping bathymetry and rip channels with WorldView2 multispectral data. *American Geophysical Union Fall Meeting (AGUFM) 2014*, EP31B-3555.
- Trimble, S. M., Houser, C., Brander, R., & Chirico, P. (2015). Mapping bathymetry in an active surf zone with the WorldView2 multispectral satellite. *American Geophysical Union Fall Meeting (AGUFM) 2015*, EP23B-0948.
- Turoglu, H. (2019). Yapay kıyıların jeomorfolojik tanımlaması: Diliskelesi kıyıları örneği (Kocaeli, Türkiye). *Coğrafya Dergisi*, 39, 11–27. <https://doi.org/10.26650/JGEOG2019-0015>
- USGS 2022a. Earth Explorer. Retrieved from: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (Last accessed: 07.02.2022)
- USGS 2022b. Landsat 5. Retrieved from: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5> (Last accessed: 31.03.2022)
- Uzakara, H., & Demir, N. (2021). Bathymetry analysis with use of Sentinel-2 images. *Turkish Journal of Remote Sensing*, 3(1), 14–20.
- Vargas, R., Wasserman, J. C. D. F. A., da Silva A. L., Tavares, T. L., Américo, C., & dos Santos, F. F. D. (2021). Satellite-derived bathymetry models from Sentinel-2A and 2B in the coastal clear waters of Arraial do Cabo, Rio de Janeiro, Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(5), 3078–3095. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v14.5.p3078-3095>
- Wang, Z., Thome, K., Lockwood, R., & Wenny, B. N. (2022). Absolute radiometric calibration of an imaging spectroradiometer using a laboratory detector-based approach. *Remote Sensing*, 14(9), 2245. <https://doi.org/10.3390/rs14092245>
- Wei, J., Wang, M., Lee, Z., Briceño, H. O., Yu, X., Jiang, L., Garcia, R., Wang, J., & Luis, K. (2020). Shallow water bathymetry with multispectral satellite ocean color sensors: Leveraging temporal variation in image data. *Remote Sensing of Environment*, 250, 112035. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2020.112035>
- Wicaksono, P., & Hafizt, M. (2018). Dark target effectiveness for dark-object subtraction atmospheric correction method on mangrove above-ground carbon stock mapping. *IET Image Processing*, 12(4), 582–587. <http://dx.doi.org/10.1049/iet-ipr.2017.0295>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 3025–3033. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Yunus, A. P., Dou, J., Song, X., & Avtar, R. (2019). Improved bathymetric mapping of coastal and lake environments using Sentinel-2 and Landsat-8 images. *Sensors*, 19(12), 2788. <http://dx.doi.org/10.3390/s19122788>