

YEŞİLİRMAK DELTASI'NDA KIYI EROZYONUNUN DOĞRUSAL REGRESYON ORANI YÖNTEMİYLE ANALİZİ

Derya ÖZTÜRK *^{ID}

Sibel UZUN *^{ID}

Alınma: 08.02.2023 ; düzeltme: 16.08.2023 ; kabul: 27.09.2023

Öz: Bu çalışmada ulusal öneme haiz sulak alanlar kapsamında tescillenen Yeşilirmak Deltası'nın yaklaşık 18,5 km'lik kıyı bölümünde gerçekleşen erozyon uzaktan algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) yardımıyla araştırılmıştır. 1985–2022 periyodunda gerçekleşen kıyı çizgisi değişimlerinin belirlenmesi ve erozyonun derecesinin anlaşılabilmesi için 1985, 1990, 1996, 2001, 2006, 2011, 2017 ve 2022 yıllarına ait Landsat-5 TM/Landsat-8 OLI uydu görüntüleri kullanılmıştır. Uydu görüntülerinden kıyı çizgilerinin belirlenmesinde normalize fark su indeksi (NDWI) ve modifiye normalize fark su indeksi (MNDWI) entegre edilmiştir. Yıllık kıyı çizgisi değişim oranları 1985–2022 periyodunda sekiz farklı yıla ait kıyı çizgilerinden doğrusal regresyon oranı (LRR) yöntemiyle %95 güven düzeyinde hesaplanmış, Yeşilirmak Nehri'nin batı kesimindeki Bölge-1'de maksimum -25,8 m/yıl, doğu kesimindeki Bölge-2'de maksimum -7,7 m/yıl'a ulaşan erozyon oranı belirlenmiştir. Kıyı çizgisi değişimleri sınıflandırıldığında deltasının %34'ü yüksek, %9'u orta, %18'i düşük derecede olmak üzere %61'inde erozyon gerçekleştiği anlaşılmıştır. 1985–2022 periyodunda erozyonla kaybedilen alanlar çakıştırma analizi ile belirlenmiş, Bölge-1'de 179,23 ha ve Bölge-2'de 82,22 ha olmak üzere toplam 261,45 ha alanın erozyon ile kaybedildiği görülmüştür. Analiz sonuçları, Yeşilirmak Deltası kıyılarındaki erozyon, birikim ve stabil alanların belirlenerek kıyı dinamiklerinin ve erozyon tehlikesinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlamış ve kıyı çizgisi değişimlerinin belirlenmesinde Landsat görüntüleri ve LRR yönteminin etkinliğini ortaya çıkarmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yeşilirmak Deltası, Kıyı Çizgisi, Erozyon, Doğrusal Regresyon Oranı, Uzaktan Algılama, Landsat

Analysis of Coastal Erosion in Yeşilirmak Delta Using Linear Regression Rate Method

Abstract: This study investigated erosion along the approximately 18.5 km coastal section of the Yeşilirmak Delta, a nationally important wetland, using remote sensing and Geographic Information Systems (GIS). Landsat-5 TM/Landsat-8 OLI satellite images from 1985 to 2022 (1985, 1990, 1996, 2001, 2006, 2011, 2017, and 2022) were used to determine shoreline changes. The shoreline determination process involved the combination of the normalized difference water index (NDWI) and the modified normalized difference water index (MNDWI). Annual rates of shoreline change were calculated using the linear regression rate (LRR) method within a 95% confidence level. Results showed a maximum erosion rate of -25.8 m/year in Zone-1, located in the western part of the Yeşilirmak River, and -7.7 m/year in Zone-2, situated in the eastern part. Erosion affected 61% of the delta, with 34% experiencing high-level erosion, 9% medium-level erosion, and 18% low-level erosion. Overlay analysis identified a total loss of 261.45 ha during 1985–2022, with 179.23 ha in Zone-1 and 82.22 ha in Zone-2. These findings enhance understanding of coastal dynamics by delineating erosion, accretion, and stable areas in the Yeşilirmak Delta. Furthermore, the study highlights the effectiveness of Landsat images and the LRR method in assessing shoreline changes.

Keywords: Yeşilirmak Delta, Shoreline, Erosion, Linear Regression Rate, Remote Sensing, Landsat

* Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 55139 Atakum/SAMSUN
İletişim Yazarı: Derya Öztürk (dozturk@omu.edu.tr)

1. GİRİŞ

Kıyı tehlikesi, doğal ekosistemlere, binalara ve altyapıya zarar verme veya bunların kaybına neden olma potansiyeline sahip bir olgunun meydana gelmesi olarak tanımlanabilir (Cambers, 2001). Kıyı erozyonu, kıyı afetlerine son derece duyarlı olduğundan en önemli kıyı tehlikelerinden biri kabul edilir (Baig ve diğ., 2020). Kıyı erozyonunun belirlenmesinde kıyı çizgisinin düzenli olarak takip edilmesi önem taşımaktadır (Li ve diğ., 2001; Bombino ve diğ., 2022). Kıyı çizgisi; deniz seviyesindeki yükselme, gelgit etkileri, dalga ve rüzgârların mevsimsel değişiklikleri nedeniyle doğal olarak sürekli değişim gösterebilmektedir (Kudale, 2010). Ancak kıyı çizgisindeki önemli değişimler sadece bu nedenlerle açıklanamaz. Antropojenik etkiler de kıyı çizgisinde büyük değişimlere neden olmaktadır (Gonçalves ve diğ., 2019). Erozyon raporlarına göre, Avrupa'da insan kaynaklı kıyı erozyonu, doğal faktörlerin neden olduğu kıyı erozyonundan çok daha fazladır (Van Rijn, 2011; Tsoukala ve diğ., 2015). Akarsu ıslahı ve barajların inşası nedeniyle kıyıya taşınan sedimentin azalması, liman ve marinaların inşası, kıyı koruma yapılarının inşası, deniz dibi taraması ve kıyıya yakın bitki örtüsünün kaldırılması, kıyı çizgisi değişimine neden olan başlıca antropojenik etkenlerdir (Chu ve diğ., 2015; Tsoukala ve diğ., 2015; Bergillos ve diğ., 2016; Singh ve diğ., 2021).

Kıyı morfodinamiğinin belirlenmesi ve erozyon riskinin değerlendirilerek gerekli önlemlerin alınmasını sağlamak için kıyı çizgisinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve değişimlerin analiz edilmesi gereklidir (Baig ve diğ., 2020). Bunun için uygun verilerin edinilmesi ve güçlü analiz yöntemlerinin benimsenmesi oldukça önemlidir (Burningham ve Fernandez-Nunez, 2020). Kıyı çizgisinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler arasında yersel ölçmeler, GNSS (Global Navigation Satellite Systems) ölçmeleri, LiDAR (Light Detection and Ranging) ve hava fotogrametrisine dayalı araştırmalar yer almaktadır (Liu ve Trinder, 2018; Zanutta ve diğ., 2020; Martínez ve diğ., 2022). Ancak bu yöntemler yoğun emek ve işgücü gerektirdiğinden zaman alıcı ve yüksek maliyetlidir. Buna karşın uzaktan algılama sinoptik ve tekrarlı veri edinimi, elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesinde kara ve su arasında kontrast sağlayan multispektral yetenekler, işlem kolaylığı, hız ve maliyet etkinliği nedenleriyle özellikle geniş araştırma sahaları için kıyı çizgisi değişimlerinin belirlenmesinde etkin bir yöntem olarak kabul edilmektedir (Dutta ve diğ., 2022). Kıyı çizgilerinin uzaktan algılama ile elde edilen uydu görüntülerinden otomatik/yarı otomatik çıkarımı için gelişmiş görüntü işleme teknikleri kullanılabilir. Bu yaklaşımlardan başlıcaları; tek bantta yoğunluk dilimleme, temel bileşenler analizi, sınıflandırma algoritmaları (örneğin; maksimum benzerlik, karar ağacı, destek vektör makinesi ve yapay sinir ağı sınıflandırması) ve spektral su indeksi algoritmalarıdır (Choung ve Jo, 2017; Wang ve diğ., 2022). Spektral su indeksleri, bantların basit matematiksel işlemlerine dayalı olup kıyı çizgisinin belirlenmesinde hızlı ve etkin yaklaşım olarak değerlendirilmektedir (Wang ve diğ., 2022). Bu kapsamda birçok araştırmacı tarafından çeşitli su indeksleri tanımlanmıştır (McFeeters, 1996; Xu, 2006; Chandrasekar ve diğ., 2010; Feyisa ve diğ., 2014; Zhou ve diğ., 2017). Bu indeksler arasından normalize fark su indeksi (normalized difference water index-NDWI) ve modifiye normalize fark su indeksinin (modified normalized difference water index-MNDWI) yüksek performansı, çok sayıda araştırmada uygulama alanı bulmasını sağlamıştır (McFeeters, 2013; Singh ve diğ., 2015; Yang ve diğ., 2017; Chang ve diğ., 2022).

Kıyı çizgisi değişim analizi, 1970'lerden itibaren kıyı çizgilerinin konumundaki mekânsal değişimleri (konum değişimi ve miktarı) belirlemek için kullanılan yöntem ve yaklaşımları ifade etmek için kullanılan geniş bir tanımlamadır (Burningham ve Fernandez-Nunez, 2020). Kıyı çizgisi değişim analizi kıyı çizgilerindeki değişimlerin matematiksel ve istatistiksel olarak belirlenmesine dayanan yöntemleri kapsar. Günümüzde Coğrafi Bilgi Sistemleriyle (CBS) hızlı ve etkin olarak uygulanabilen bu yöntemlerden en yaygın kullanılan yaklaşımlar; bitiş noktası oranı (end point rate-EPR), doğrusal regresyon oranı (linear regression rate-LRR), kıyı çizgisi değişim zarflama (shoreline change envelope-SCE), net kıyı çizgisi değişimi (net shoreline movement-NSM) yöntemleridir (Oyedotun, 2014; Murray ve diğ., 2023). Bu yöntemler arasından LRR ikiden fazla kıyı çizgisini kullanma potansiyeline sahiptir ve belirli bir kesit için tüm kıyı

çizgilerini değerlendirmeye alıp en küçük kareler regresyon çizgisini oluşturarak değişim oranlarının belirlenmesine olanak sağlar (Salghuna ve Bharathvaj, 2015; Baig ve diğ., 2020; Dutta ve diğ., 2022).

Deltalar sedimantolojik açıdan oldukça aktif bölgelerdir ve yağışlar yardımıyla karadan akarsular ile denize taşınan malzeme ile beslenirler. Akarsular tarafından taşınan malzemenin azalması durumunda birikim desteklenememekte ve bu durumda deniz yönünden gelen rüzgâr ve dalga etkisi ile ortaya çıkan aşınım, kıyı çizgisinin kara yönünde gerilemesine yani kıyı erozyonuna neden olmaktadır (Köle ve Ataol, 2016). 19.03.2020 tarihinde ulusal öneme haiz sulak alanlar kapsamında tescillenen Yeşilirmak Deltası'nda (Tarım ve Orman Bakanlığı, 2022) Yeşilirmak Nehri üzerinde inşa edilen barajlardan sonra sediment taşınımı önemli ölçüde azalmıştır (Avcı ve diğ., 2003; Süzen ve Özhan, 2003; Kuleli, 2010; Köle ve Ataol, 2016). Bunun yanı sıra nehir yatağından kum ve çakıl alımı da sediment bütçesinin açık vermesinde etkili olmuştur (Zeybek ve diğ., 2018). Bölgede hâkim olan kuzeybatı yönlü rüzgârlar, kıyı morfolojisi ve batimetrik özelliklere bağlı olarak meydana gelen dalga ve akıntılar ise erozyona neden olmakta ve kıyı gerilemesi yaşanmaktadır (Atalay Dutucu, 2016; Köle ve Ataol, 2016; Atalay Dutucu ve diğ., 2017).

Deltadaki ciddi erozyon tehlikesi nedeniyle, kıyı çizgisindeki değişimler çeşitli bilimsel araştırmalara konu olmuştur. Avcı ve diğ. (2003) 1954–1999, Köle ve Ataol (2016) 2000–2016 ve Atalay Dutucu (2016) 1957–2013 periyodundaki kıyı çizgisi değişimlerini haritalar ve uydu görüntülerinden yararlanarak elde edilen kıyı çizgilerinin karşılaştırılması ve toplam alansal kayıp bazında incelemiştir. Kuleli (2010) ise 1989–2009 periyodundaki değişimleri kıyı boyunca belirlenen kesitler bazında yıllık değişim oranları yönünden araştırmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalar en yakın tarih olarak 2016 yılına kadar uzanmakta olup güncel etkileri kapsamamaktadır.

Bu çalışma, Yeşilirmak Deltası'nda mevcut ve gelecekteki faaliyetler kapsamında daha iyi planlama ve yönetim için zamansal kıyı çizgisi değişimlerinin anlaşılması ve muhtemel tehlikelerin ortaya çıkarılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 1985–2022 periyodundaki 37 yıllık süreçte sekiz farklı yıla (1985, 1990, 1996, 2001, 2006, 2011, 2017 ve 2022) ait uydu görüntüleri kullanılarak NDWI ve MNDWI indekslerinin entegrasyonu ile kıyı çizgileri otomatik olarak belirlenmiştir. 1985–2022 periyodundaki kıyı çizgisi değişim eğilimi sekiz farklı yılın kıyı çizgilerinin LRR yöntemiyle istatistiksel analizine dayalı olarak belirlenmiş, deltanın kıyısı erozyon ve birikim oranlarına (m/yıl) göre sınıflandırılmıştır. Ayrıca deltada 1985–2022 periyodunda erozyon ile kaybedilen ve birikim ile kazanılan alanlar (ha) karşılaştırma analiziyle belirlenmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI: YEŞİLIRMAK DELTASI

Yeşilirmak Deltası Orta Karadeniz Bölümünde, Samsun ili sınırları içerisinde (Çarşamba, Terme, Tekkeköy ve Salıpazarı ilçeleri) 36°23'–37°07' doğu boylamları ve 41°06'–41°22' kuzey enlemleri arasında yer alır (Uğurlu ve diğ., 2008). Karadeniz'de 88 km uzunluğunda kıyısı bulunup (Bağcı ve Şahin, 2018) yaklaşık 600 km² yüzölçümüne sahiptir (Atalay Dutucu, 2016). Türkiye'nin ikinci büyük delta ovası olan Yeşilirmak Deltası'nın batı sınırını Derbent Burnu ölü falezleri oluştururken, delta doğuda Akçay Vadisi ile son bulmaktadır. Yeşilirmak Deltası'nın kıyılarında en büyükleri Simenit ve Akgöl olan çok sayıda lagün, bataklık ve kumsallar bulunmaktadır (Bağcı ve Şahin, 2018). Yeşilirmak Nehri'nin en önemli kolları Kelkit Çayı, Çekerek Çayı ve Tersakan Çayıdır (Köle ve Ataol, 2016). Yeşilirmak Nehri, Terme Çayı ve Abdal Çayı ile diğer akarsuların taşıdıkları alüvyonlarla oluşan Yeşilirmak Deltası'nda kıyılarda şekillenme ve kıyı çizgisi değişimleri günümüzde de devam etmektedir (Uğurlu ve diğ., 2008; Bağcı ve Şahin, 2018). Yeşilirmak ve yan kolları üzerinde toplam 29 adet baraj bulunmaktadır. Deltaya en yakın barajlar sırasıyla 1981 ve 1982 yıllarında işletmeye açılan Hasan Uğurlu ve Suat Uğurlu barajlarıdır. Bu barajlar Yeşilirmak'a katılan sedimenti tutan yapay bir kapan konumundadır (Köle ve Ataol, 2016). Yeşilirmak Deltası'nda yıllık sıcaklık ortalaması 14,4 °C

ve yıllık yağış miktarı 900–1000 mm arasında olup ılıman iklim koşulları etkilidir. Ekili ve dikili tarım alanları delta yüzölçümünün %67'sine karşılık gelmektedir. Deltada başta fındık olmak üzere mısır, sebze ve meyve üretimi yapılmaktadır (Bağcı ve Şahin, 2018).

Bu çalışmada Yeşilirmak Deltası'nda erozyonun etkili olduğu Yeşilirmak Nehri'nin batı kesiminde yaklaşık 8,5 km (Bölge-1) ve doğu kesiminde yaklaşık 10 km (Bölge-2) kıyı araştırma alanını oluşturmaktadır (Şekil 1).



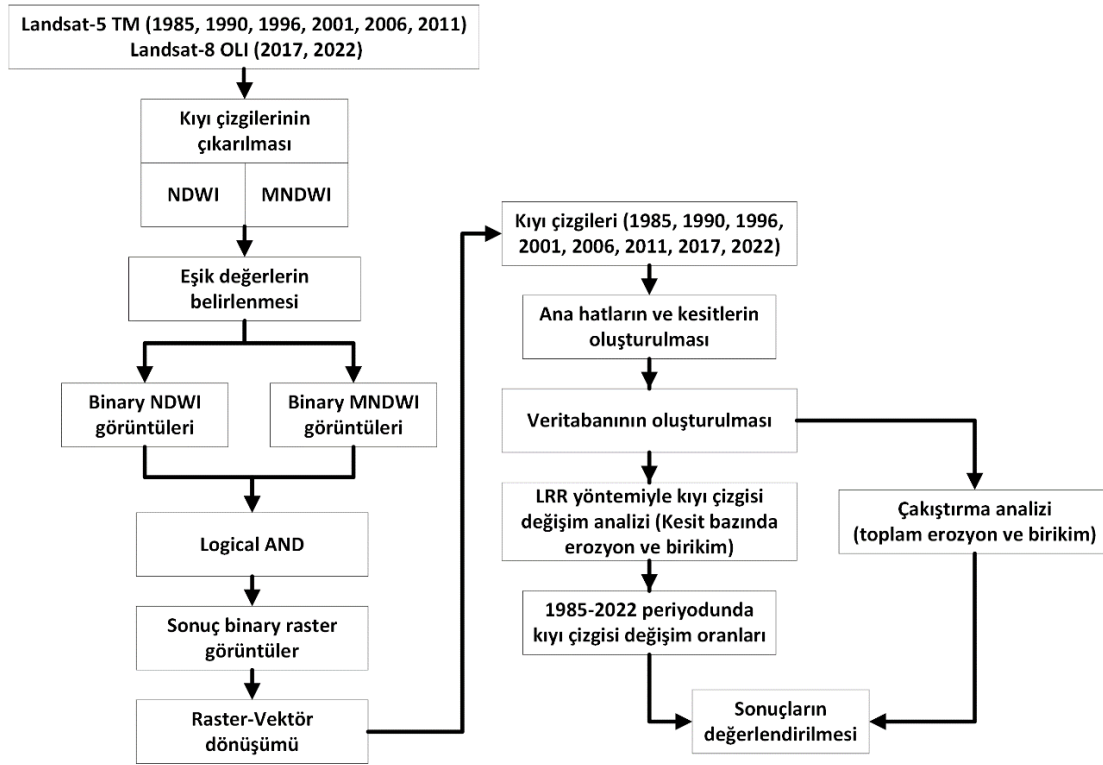
Şekil 1:
Çalışma alanı

3. METODOLOJİ

Yeşilirmak Deltası'nın kıyı çizgisi değişim analizi CBS ortamında LRR yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kıyı çizgisi değişim analizi için 28.06.1985, 25.05.1990, 26.06.1996, 23.05.2001, 22.06.2006, 20.06.2011 tarihli Landsat-5 TM ve 04.06.2017, 17.05.2022 tarihli Landsat-8 OLI uydu görüntüleri kullanılmıştır. Regresyon modelinden anlamlı sonuçlar elde edebilmek için, kıyı çizgisinin zamansal aralıkları analiz periyodu boyunca yaklaşık eşit olacak şekilde 5-6 yıl olarak belirlenmiştir. Ayrıca mevsimsel farklılıkları en aza indirmek için yakın aylara ait görüntüler kullanılmıştır. Açık veri özelliğindeki Landsat-5 TM ve Landsat-8 OLI uydu görüntüleri USGS Earth Explorer veri portalı Collection 2 Level-2 arşivinden (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) ücretsiz olarak indirilmiştir. Çalışmada kullanılan multispektral bantların piksel boyutu 30 m'dir (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>). Collection 2 Level-2 görüntülerinin radyometrik kalibrasyon ve atmosferik düzeltme

işlemi USGS tarafından uygulanmış olduğundan analize hazır verilerdir (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>).

Çalışmada öncelikle CBS ortamında 1985, 1990, 1996, 2001, 2006, 2011, 2017 ve 2022 yılı Landsat görüntülerinden NDWI ve MNDWI indeks sonuçlarının entegrasyonu ile analizde kullanılan tüm yıllar için kıyı çizgileri belirlenmiştir. Vektör forma dönüştürülen kıyı çizgileri coğrafi veri tabanına aktarılmıştır. Kıyı çizgisi değişimlerinin daha iyi yorumlanabilmesi için Yeşilirmak Nehri'nin batı kesimi (Bölge-1) ve doğu kesimi (Bölge-2) iki ayrı bölge olarak incelenmiştir. Kıyı çizgisi değişim oranlarının hesaplanması için her iki bölgede kıyı çizgilerine yaklaşık paralel olacak şekilde (çalışmada 1985 yılı kıyı çizgisine paralel bir hat oluşturulmuştur) deniz tarafında bir ana hat çizilmiş, ardından bu ana hatta dik olarak 50 m aralıklarla ve tüm yıllara ait kıyı çizgilerini kesecek şekilde kesitler oluşturulmuştur. Kesitlerin her yıl için ana hattan uzaklıkları belirlenerek veri tabanına aktarılmıştır. LRR yöntemiyle %95 güven düzeyinde her kesit için tüm yılların kıyı çizgisi noktalarından bir en küçük kareler regresyon çizgisi elde edilerek değişimler istatistiksel olarak analiz edilmiş ve değişim trendi belirlenmiştir. 1985 ve 2022 yılı kıyı çizgileri esas alınarak gerçekleştirilen çakıştırma (overlay) analizi ile 1985–2022 periyodundaki net erozyon ve birikim alanlarının yüzölçümleri hesaplanmıştır. Analizlerin tamamı ArcGIS 10.3 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ana işlem adımları Şekil 2'deki iş akış şemasında gösterilmektedir.



Şekil 2:
Çalışmanın ana işlem adımları

3.1. Kıyı Çizgilerinin Belirlenmesi

Kıyı çizgilerinin belirlenmesinde NDWI (McFeeters, 1996) ve MNDWI (Xu, 2006) indeksleri (Denklem 1 ve 2) kullanılmıştır. Deltanın NDWI ve MNDWI görüntülerinde kara-su ayrımı için görüntü üzerinde bilinen piksellerden yararlanılarak eşik değerler belirlenmiş ve bu eşik değerlere göre kara ve su olarak iki sınıf oluşturulmuştur. Kıyı çizgilerinin doğruluğunun artırılması amacıyla NDWI ve MNDWI sonuçları birleştirilmiştir. NDWI ve MNDWI indeks

sonuçlarının birleştirilmesinde Boolean yaklaşımı (Ozturk ve Sesli, 2015) kullanılmıştır. Kara 1 ve su 0 olarak kodlanarak binary görüntüler oluşturulmuş, oluşturulan binary görüntülerde logical AND operatörü ile sonuç görüntü elde edilmiştir (binary NDWI ve binary MNDWI görüntüleri çarpılmıştır). Son olarak sonuç binary görüntü verileri vektör veriye dönüştürülmüştür.

$$NDWI = (Green - NIR)/(Green + NIR) \quad (1)$$

$$MNDWI = (Green - MIR)/(Green + MIR) \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2'de; Green yeşil batta yansıtım değeri, NIR yakın kızılötesi bantta yansıtım değeri ve MIR orta kızılötesi bantta yansıtım değeridir.

3.1.1. Kıyı Çizgilerinin Konum Belirsizliği

Kıyı çizgisi konumunun doğruluğu çeşitli faktörlerden etkilenir. Bu çalışmada Ford (2011) takip edilerek piksel belirsizliği, coğrafi referanslandırma belirsizliği ve sayısallaştırma belirsizliği olmak üzere üç belirsizlik terimi değerlendirmeye alınmıştır. Toplam konumsal belirsizlik, hataların kaynaklarının karelerinin toplamının karekökü olarak tanımlanır (Denklem 3) (Yadav ve diğ., 2021).

$$U_t = \sqrt{U_p^2 + U_g^2 + U_d^2} \quad (3)$$

Burada; U_t toplam belirsizlik, U_p piksel belirsizliği, U_g coğrafi referanslandırma belirsizliği ve U_d sayısallaştırma belirsizliğidir.

Piksel belirsizliği uydu görüntüsünün piksel boyutuyla ilgili olup çalışmada kullanılan tüm uydu görüntüleri 30 m piksel boyutludur. Coğrafi referans belirsizliği uydu görüntüleriyle sağlanan meta verilerden elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan Landsat görüntülerinin coğrafi referans belirsizliği 5,0 m ile 12,0 m arasındadır. Kıyı çizgilerinin görsel inceleme yoluyla manuel olarak sayısallaştırılmasıyla ilgili belirsizlik sayısallaştırma belirsizliği olarak tanımlanır. Kıyı çizgilerinin otomatik olarak belirlenmesi durumunda sayısallaştırma belirsizliği 0 kabul edilebilir (Islam ve Crawford, 2022). Bu çalışmada kıyı çizgileri otomatik olarak çıkarıldığından tüm kıyı çizgileri için 0 olarak değerlendirilmiştir.

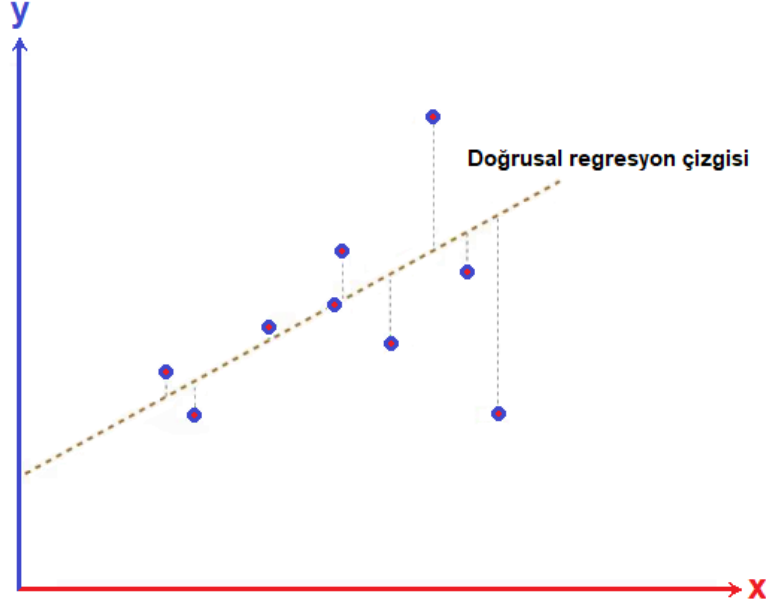
3.2. LRR Yöntemiyle Kıyı Çizgisi Değişim Oranlarının Belirlenmesi

LRR ile kıyı çizgisi değişim oranlarının belirlenmesinde öncelikle analize dâhil edilecek tüm kıyı çizgilerini kesen kesitlerin oluşturulması gerekmektedir. Kesitler ile çoklu kıyı çizgisi sınırlarının hareket mesafesinin ölçülmesi amaçlandığından (Jackson Jr ve diğ. 2012) tüm kıyı çizgilerini mümkün olduğunca dik kesecek kesitlerin oluşturulması önemlidir. Ancak kıyı çizgilerinin karmaşıklığı arttıkça mesafenin tanımı belirsizleşmektedir. Sapma açısı 60 dereceye ulaştığında mesafeler de dik mesafelerin iki katı kadar olmaktadır. Bu çalışmada kesitler analizde kullanılan tüm kıyı çizgilerini mümkün olduğunca dik kesecek şekilde oluşturulmuştur.

Kıyı çizgisi değişim oranlarının en küçük kareler yöntemine dayalı olan LRR yöntemiyle hesaplanmasında analize konu tüm tarihler için kıyı çizgileri kullanılarak her bir kesit için Denklem 4'e göre en uygun doğrusal regresyon çizgisi (Şekil 3) belirlenir (Sowmya ve diğ., 2019; Baig ve diğ., 2020; Vallarino Castillo ve diğ., 2022).

$$y = mx+b \quad (4)$$

Burada; m doğrunun eğimini, b sabit değeri (model kesişim değeri), x bağımsız değişkeni, y ise bağımlı değişkeni belirtmektedir. Çalışmada bağımsız değişken kıyı çizgilerinin yılları, bağımlı değişken bir kesit için ana hattın itibaren kıyı çizgilerinin kestiği noktaya kadar olan mesafelerdir (Das ve diğ., 2021; Elfadaly ve diğ., 2022). Kıyı çizgisi değişim oranı eğer ana hat su tarafında ise “-m”, kara tarafında ise “m” değerine eşittir.



Şekil 3:
Doğrusal regresyon

Kıyı çizgisi değişim analizinde doğrusal regresyonun kullanılmasının başlıca avantajları; zaman serisindeki tüm verilerin kullanılabilmesi, bu sayede rastgele hataların ve kısa vadeli-geçici değişim değerlerinin tüm analiz sonucuna etkisinin azaltılması ve kabul gören istatistiksel modellere dayalı olup hesaplamaların kolay olmasıdır (Dolan ve diğ., 1991; Ozturk ve diğ., 2015).

3.2.1. Kıyı Çizgisi Değişim Oranlarının Belirsizliği

LRR ile kıyı çizgisi değişim oranları %95 güven düzeyinde hesaplanmıştır. Güven düzeyi ile regresyon eğiminin standart hatası (standard error-SE) (Denklem 5) kıyı çizgisi değişim oranının belirsizliğini açıklar. Güven aralığı, eğimin standart hatasının kullanıcı tarafından belirlenen güven yüzdesinde iki kuyruklu test istatistiği ile çarpılmasıyla hesaplanır (O'Brien ve diğ., 2014; Karimi ve diğ., 2021).

$$SE(m) = \sqrt{\frac{1}{n-2} * \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad (5)$$

Burada; SE(m) m regresyon eğiminin standart hatası, n toplam örneklem büyüklüğü, y_i bağımlı değişkeninin gerçek değeri, \hat{y}_i bağımlı değişkeninin tahmin edilen değeri, x_i bağımsız değişkeninin gerçek değeri, \bar{x} bağımsız değişkeninin ortalama değeridir (<https://www.statology.org/standard-error-of-regression-slope/>).

3.3. Çakıştırma Analiziyle Erozyon ve Birikim Yüzölçümlerinin Belirlenmesi

Çakıştırma analizi, CBS'de farklı temaları temsil eden iki ya da daha çok sayıdaki veri katmanını üst üste çakıştırarak yeni bir veri katmanı oluşturmayı sağlayan mekânsal bir analizdir (Zhang ve diğ., 2021). Geometrik veri ve özneliklerinin kullanımına dayanan çakıştırma analizi yeni bilgilere ulaşmak için birden çok mekânsal veri kümesinden gelen verileri veya bilgileri birleştirme işlemi olarak tanımlanabilir (Reddy, 2018). Çakıştırma analiziyle erozyon ve birikim alanlarının belirlenmesi ve yüzölçümü hesabı, uygulama ve yorumlama açısından oldukça basittir. Ayrıca kesit yönteminin kullanımındaki zorluklarda alternatif ve tamamlayıcı bir değerlendirme sunmaktadır (Khallaghi ve Pontius Jr, 2022). Bu çalışmada 1985 ve 2022 yıllarına ait kıyı çizgileri, Bölge-1 ve Bölge-2'nin sınır kesitleri ve deltanın nehir ağzındaki sınırları kullanılarak çakıştırma analizi ile alanlar oluşturulmuş ve 1985–2022 arasında gerçekleşen net erozyon ve birikim alanlarının yüzölçümleri hesaplanmıştır.

4. BULGULAR

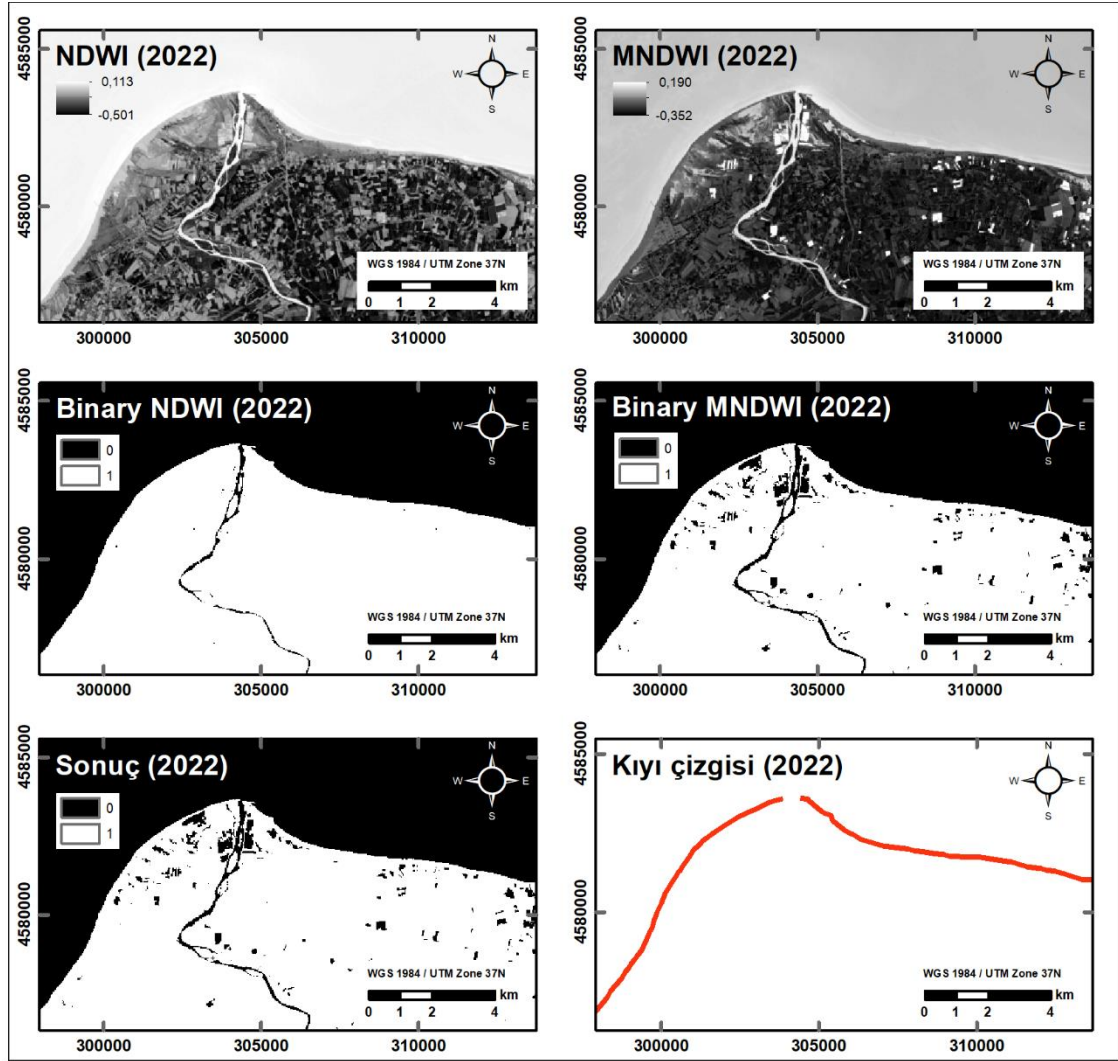
1985, 1990, 1996, 2001, 2006 ve 2011 yıllarına ait Landsat-5 TM, 2017 ve 2022 yıllarına ait Landsat-8 OLI uydu görüntülerinden NDWI ve MNDWI indekslerinin entegrasyonu ile kıyı çizgileri çıkarılmıştır. LRR analizi ile kesitler bazında yıllık kıyı çizgisi değişim oranları elde edilmiş ve LRR değerleri sınıflandırılarak kıyı çizgisi değişim haritası oluşturulmuştur. 1985 ve 2022 yıllarına ait kıyı çizgilerinin çakıştırma analizi sonucunda net erozyon ve birikim alanlarının yüzölçümleri elde edilmiştir. Yeşilirmak Deltası'nın kıyı çizgilerinin elde edilmesi 4.1 ve kıyı çizgisi değişim analizleri 4.2 bölümünde ele alınmıştır.

4.1. Yeşilirmak Deltası'nın Kıyı Çizgileri

1985, 1990, 1996, 2001, 2006, 2011, 2017 ve 2022 yılları NDWI ve MNDWI indekslerinin uygulanması sonucunda kıyı çizgileri belirlenmiştir. Tüm indeks görüntülerinde bilinen pikseller yardımıyla belirlenen eşik değerler (Tablo 1) yardımıyla kara için 1 ve su için 0 değeri kodlanarak binary indeks görüntüleri oluşturulmuştur. NDWI ve MNDWI indeks görüntüleri logical AND operatörüyle birleştirilerek (binary NDWI x binary MNDWI) sonuç görüntü elde edilmiştir. Kara için 1 ve su için 0 kodlanmış sonuç raster, vektör forma dönüştürülmüştür. Şekil 4'te 2022 yılı için kıyı çizgisinin çıkarımı tüm aşamalarıyla verilmiştir. Yeşilirmak Deltası'nın 1985, 1990, 1996, 2001, 2006, 2011, 2017 ve 2022 yılları için elde edilen kıyı çizgileri Şekil 5'te gösterilmektedir.

Tablo 1. Su indekslerinde uygulanan eşik değerleri

| Görüntü | NDWI eşik değeri | MNDWI eşik değeri |
|---------|------------------|-------------------|
| 1985 | 0,008 | 0,028 |
| 1990 | 0,021 | 0,043 |
| 1996 | 0,007 | 0,018 |
| 2001 | 0,001 | 0,015 |
| 2006 | 0,023 | 0,038 |
| 2011 | 0,024 | 0,034 |
| 2017 | 0,013 | 0,021 |
| 2022 | 0,018 | 0,019 |



Şekil 4:
Yeşilirmak Deltası'nda 2022 yılı için kıyı çizgisinin çıkarımı

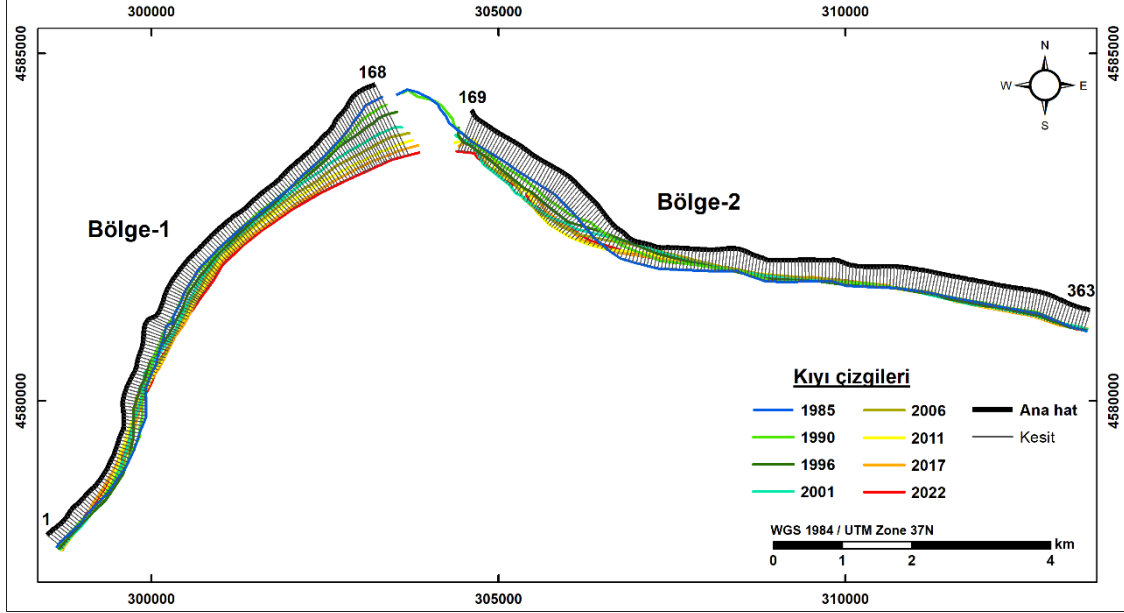
Kıyı çizgilerinin konum belirsizliği Denklem 3'e göre belirlenmiştir (Tablo 2). Tablo 2'ye göre kıyı çizgilerinin toplam konum belirsizliği 30,4 ila 32,3 m arasında değişmektedir.

Tablo 2. Kıyı çizgilerinin konum belirsizliği

| Kıyı Çizgisi | Up | Ug | Ud | Ut |
|--------------|------|------|----|------|
| 1985 | 30 m | 6,0 | 0 | 30,6 |
| 1990 | 30 m | 12,0 | 0 | 32,3 |
| 1996 | 30 m | 11,4 | 0 | 32,1 |
| 2001 | 30 m | 5,3 | 0 | 30,5 |
| 2006 | 30 m | 6,1 | 0 | 30,6 |
| 2011 | 30 m | 5,0 | 0 | 30,4 |
| 2017 | 30 m | 6,3 | 0 | 30,7 |
| 2022 | 30 m | 6,6 | 0 | 30,7 |

4.2. Yeşilirmak Deltası'nın Kıyı Çizgisi Değişimi

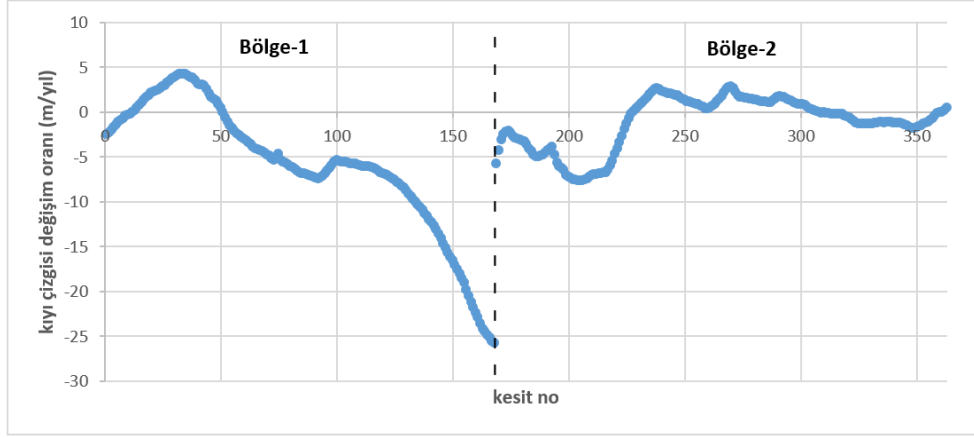
Araştırma alanı Yeşilirmak Nehri'nin batı kesimi (Bölge-1) ve doğu kesimi (Bölge-2) olarak iki ayrı bölgeye ayrılarak ayrı ayrı incelenmiştir. LRR analizini gerçekleştirmek için 50 m aralıklarla ve tüm kıyı çizgilerini mümkün olduğunca dik kesecek şekilde Bölge-1 için 168 kesit (kesit 1–168), Bölge-2 için 195 kesit (kesit 169–363) oluşturulmuştur (Şekil 5).



Şekil 5:

Yeşilirmak Deltası'nda kıyı çizgileri, ana hat ve tüm kıyı çizgilerini kesen kesitler

1985 ve 2022 arasındaki 37 yıllık periyotta iki bölge için LRR yöntemiyle %95 güven düzeyinde belirlenen kıyı çizgisi değişim oranları Şekil 6'da ve özet istatistikleri Tablo 3'te verilmiştir. Şekil 6 incelendiğinde her iki bölgede bir yandan erozyon yaşanırken diğer yandan birikim gerçekleştiği ancak Bölge-1'deki erozyonun Bölge-2'den daha uzun bir kıyıda ve daha fazla olduğu görülmektedir. Bölge-1'de 38 kesitte (13–50 kesitleri) kıyı çizgisinin yıllık değişim oranı 0'ın üzerinde olup ortalama değer 2,5 m/yıl'dır. Diğer taraftan 130 kesitte (1–12 ve 51–168 kesitleri) yıllık değişim oranı 0'ın altında olup ortalama değer -8,5 m/yıl olarak belirlenmiştir. Bölge-2'de ise 82 kesitte (228–307 ve 362–363 kesitleri) yıllık değişim oranı 0'ın üzerinde olup ortalama değer 1,3 m/yıl ve 113 kesitte (169–227 ve 308–361 kesitleri) yıllık değişim oranı 0'ın altında olup ortalama değer -3,0 m/yıl'dır. Her iki bölgede de değişim oranı 0'ın altında olan kesit sayısı ve oran değerleri, 0'ın üzerinde değer alan kesitlerden fazla olduğundan ortalama değerler bakımından deltada belirgin erozyon etkisi görülmektedir. Yıllık değişim oranları ortalama olarak Bölge-1 için -6,0 m/yıl ve Bölge-2 için -1,2 m/yıl olarak belirlenmiş, buna göre çalışma alanında her iki bölge için ciddi erozyon etkisinin bulunduğu ve Bölge-1'deki değişim etkisinin çok daha yüksek olduğu görülmüştür. Yıllık maksimum erozyon oranı Bölge-1'de -25,8 m/yıl ye Bölge 2'de -7,7 m/yıl'a ulaşmıştır. Şekil 7'de LRR yöntemiyle %95 güven düzeyinde belirlenen kıyı çizgisi değişim oranlarının kesitler bazında standart hataları görülmektedir. Standart hatalar Bölge-1'de 0,1–1,7, Bölge-2'de 0,2–3,0 aralığında olup ortalama standart hata Bölge-1'de 0,8, Bölge-2'de 1,1'dir.

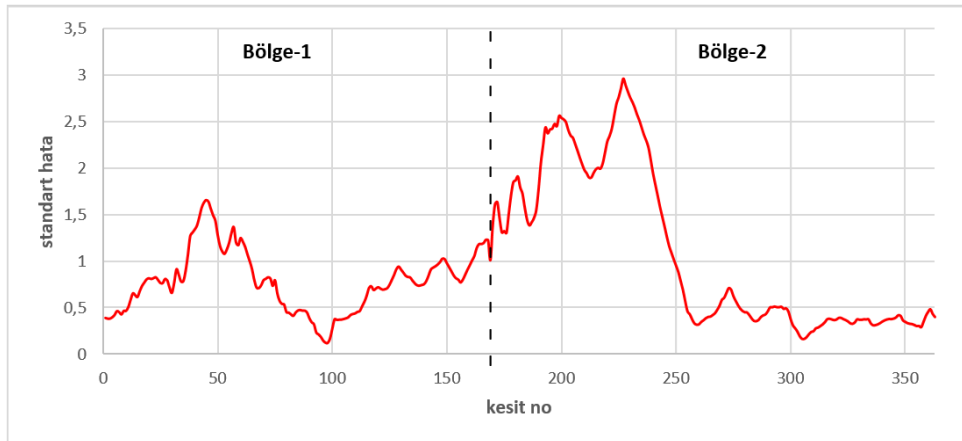


Şekil 6:

Yeşilirmak Deltası'nda LRR yöntemiyle belirlenen kıyı çizgisi değişim oranları (1985–2022)

Tablo 3. LRR yöntemine göre kıyı çizgisi değişim oranlarının (1985–2022) özet istatistiği

| | Bölge-1 | Bölge-2 |
|--|---------|---------|
| Kesit sayısı | 168 | 195 |
| Ortalama oran (m/yıl) | -6,0 | -1,2 |
| Standart sapma (m/yıl) | 7,3 | 2,9 |
| Maksimum erozyon (m/yıl) | -25,8 | -7,7 |
| Maksimum birikim (m/yıl) | 4,2 | 2,8 |
| Kıyı çizgisi değişim oranı ≥ 0 olan kesit sayısı | 38 | 82 |
| Kıyı çizgisi değişim oranı ≥ 0 olan kesitlerin ortalaması (m/yıl) | 2,5 | 1,3 |
| Kıyı çizgisi değişim oranı ≥ 0 olan kesitlerin standart sapması | 1,2 | 0,7 |
| Kıyı çizgisi değişim oranı < 0 olan kesit sayısı | 130 | 113 |
| Kıyı çizgisi değişim oranı < 0 olan kesitlerin ortalaması (m/yıl) | -8,5 | -3,0 |
| Kıyı çizgisi değişim oranı < 0 olan kesitlerin standart sapması | 6,4 | 2,5 |



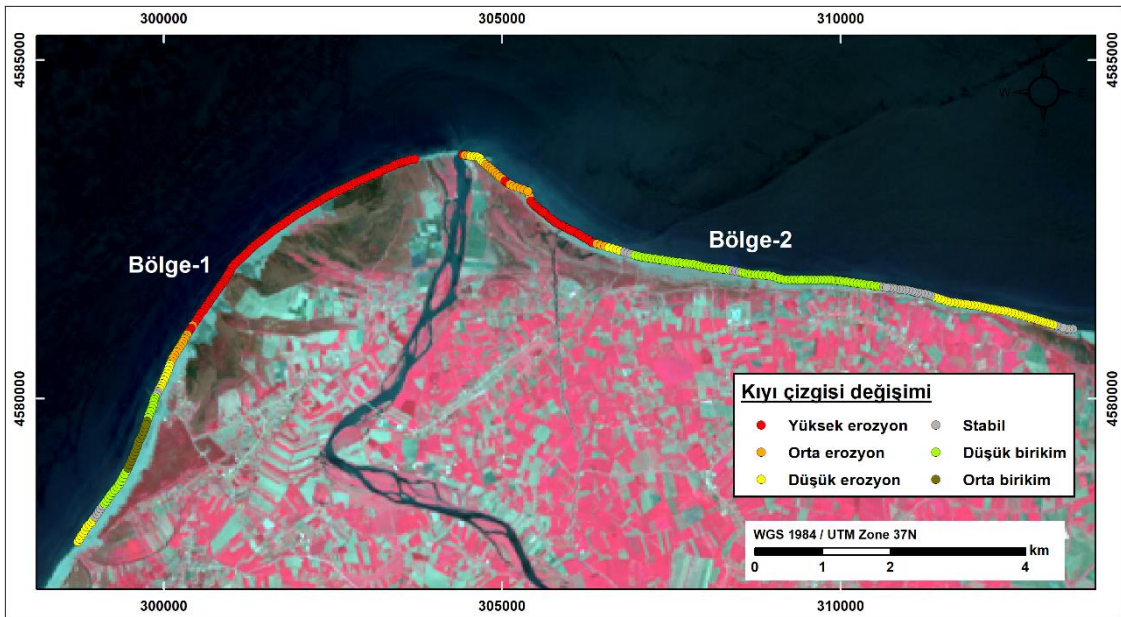
Şekil 7:

LRR yöntemiyle belirlenen kıyı çizgisi değişim oranlarının standart hatası

Yeşilirmak Deltası'nda kıyı çizgisi, kesitlerin LRR değerlerine göre birikim ve erozyon derecesi açısından kategorilere (Chenthamil Selvan ve diğ., 2016; Baral ve diğ., 2018) ayrılmıştır (Tablo 4). Sınıflandırılmış kıyı çizgisi (2022 yılı için) Şekil 8'de uydu görüntüsü (17.05.2022 Landsat-8 OLI, RGB:543) üzerinde gösterilmektedir. Kategorilendirmeye göre Bölge-1'in %57'si yüksek, %7'si orta, %11'i düşük derecede olmak üzere %75'i erozyon özelliği taşımaktadır. Bölge-2'nin ise %14'ü yüksek, %10'u orta, %25'i düşük derece olmak üzere %49'u erozyon özelliği göstermektedir. Sabit kıyı özelliğindeki alanlar (stabil) Bölge-1'in sadece %4'ünü oluştururken Bölge-2'nin %14'ünde görülmektedir. Bölge-1'in %12'si düşük, %9'u orta birikim gösterirken yüksek birikim gösteren alan olmamıştır. Bölge-2'de ise %37'lik kısım düşük birikim gösterirken, orta ve yüksek birikim özelliği gösteren alan yoktur. Araştırma alanı bütün olarak değerlendirildiğinde ise 1985–2022 periyodunda %34'ü yüksek, %9'u orta, %18'i düşük derecede olmak üzere incelenen alanın %61'inin erozyon tehlikesi altında olduğu anlaşılmaktadır.

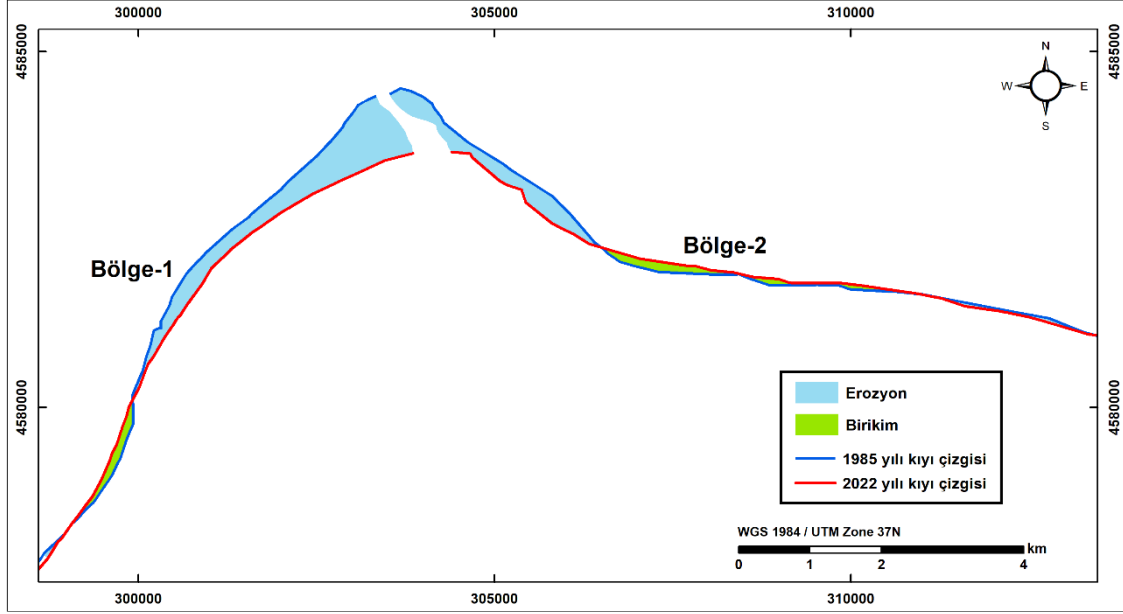
Tablo 4. Yıllık kıyı çizgisi değişim oranlarının sınıflandırılması

| Kıyı çizgisi değişim oranı (m/yıl) | Sınıflandırma | Kesit Sayısı (Yüzdesi) | | |
|------------------------------------|----------------|------------------------|---------------------|---------------------|
| | | Bölge-1 | Bölge-2 | Tüm Alan |
| < -5 | Yüksek erozyon | 96 (%57) | 28 (%14) | 124 (%34) |
| -3,01 – (-5,00) | Orta erozyon | 12 (%7) | 20 (%10) | 32 (%9) |
| -0,51 – (-3,00) | Düşük erozyon | 18 (%11) | 48 (%25) | 66 (%18) |
| -0,50 – (-0,50) | Stabil | 7 (%4) | 28 (%14) | 35 (%10) |
| +0,51 – (+3,00) | Düşük birikim | 20 (%12) | 71 (%37) | 91 (%25) |
| +3,01 – (+5,00) | Orta birikim | 15 (%9) | - | 15 (%4) |
| > +5,00 | Yüksek birikim | - | - | - |
| | | Toplam kesit 168 | Toplam kesit 195 | Toplam kesit 363 |



Şekil 8:
Yeşilirmak Deltası'nda kıyı çizgisi değişim sınıfları

Yeşilirmak Deltası'nda 1985–2022 periyodunda erozyon nedeniyle gerçekleşen net alansal kayıpları belirlemek amacıyla karşılaştırma analizi uygulanmıştır (Şekil 9). Bölge-1'de 179,23 ha ve Bölge-2'de 82,22 ha olmak üzere toplam 261,45 ha alan erozyon ile kaybedilmiştir. Diğer yandan Bölge-1'de 16,48 ha ve Bölge-2'de 29,21 ha birikim gerçekleşmiştir.



Şekil 9:

Yeşilirmak Deltası'nda 1985–2022 periyodunda gerçekleşen erozyon ve birikim alanları

5. TARTIŞMA

Kıyı müdahaleleri kıyının doğal mekanizmasını ve kuralını bozabilmekte (Deepika ve diğ., 2014) ve bu nedenle kıyı çizgileri çoklu mekânsal ve zamansal ölçeklerde şekil ve konum değiştirebilmektedir (Burningham ve Fernandez-Nunez, 2020). Akarsuların üzerinde inşa edilen barajlar, akarsu yataklarından kum ve çakıl alımı kıyıya sediment taşınımının azalmasına neden olmakta ve kıyı akıntısı ve dalga erozyonu ile deltalar küçülme sürecine girebilmektedir (Yılmaz, 2005; Köle ve Ataol, 2016). Kıyı çizgisi değişimlerinin izlenmesiyle kıyı erozyonunun belirlenmesi, kıyı koruma amaçlı politikaların ve planların geliştirilmesi açısından oldukça önemlidir (Gonçalves ve diğ., 2019). Ekolojik dengenin sağlanması ve biyolojik çeşitliliğin korunmasında büyük önem taşıyan sulak alanlar, yöre ve ülke ekonomisine çok büyük katkıları olan ekosistemlerdir (Can ve Taş, 2012). Bu nedenle ulusal öneme haiz sulak alanlar kapsamında tescillenen Yeşilirmak Deltasında sürdürülebilir gelişmenin sağlanması için kıyı çizgisinin takibi önem taşımaktadır. Bu çalışmada Yeşilirmak Deltası'nın yaklaşık 18,5 km uzunluğundaki bölümünde (Yeşilirmak Nehri'nin batı kesiminde yaklaşık 8,5 ve doğu kesiminde yaklaşık 10 km) 1985–2022 yılları arasında geçen 37 yıllık zaman periyodunda gerçekleşen kıyı çizgisi değişimleri araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları deltanın incelenen bölümünün %34'ünde yüksek, %9'unda orta ve %18'inde düşük erozyon gerçekleştiğini ortaya çıkarmıştır. Deltada yaşanan erozyon daha önce de çeşitli araştırmalarda ele alınmıştır. Avcı ve diğ.'nin (2003) topoğrafik haritalar ve Landsat-5 TM uydu görüntülerine dayalı gerçekleştirdikleri çalışmada 1954–1975 periyodunda deltada deniz yönünde ilerleme, 1975–1999 periyodunda ise kıyı erozyonunun oluştuğuna dikkat çekilmiştir. Çalışmada 1980'li yılların başlarında Yeşilirmak üzerinde inşa edilen barajların kıyı erozyonunda önemli etkiye sahip olduğu belirlenmiştir. Daha sonra Kuleli (2010) 1989–2009 periyodundaki değişimi Landsat-5 TM uydu görüntülerinden, Köle ve Ataol (2016) 2000–2016 periyodundaki değişimi Landsat-7 ETM+ ve WorldView-2

uydu görüntüleri kullanarak araştırmış ve deltadaki kıyı erozyonu ve gerilemenin devam ettiği sonucunu ortaya çıkarmışlardır. Kuleli (2010) 1989–2009 periyodundaki 20 yılda -620 m'ye varan (yıllık oran -31,0 m/yıl), Köle ve Ataol (2016) 2000–2016 periyodundaki 16 yılda toplam olarak -330 m'ye varan (yıllık oran -20,6 m/yıl) erozyon belirlemiştir. Köle ve Ataol (2016) 2000–2016 periyodunda gerçekleşen erozyonun nehrin batı kısmında daha etkin olduğuna işaret ederken Atalay Dutucu (2016) 1957–2013 periyodunu alt periyotlara bölerek gerçekleştirdiği çalışmada 2009–2013 kısa periyodu için kıyı erozyonunun özellikle nehrin batısında ve nehir ağzına yakın kısmındaki ciddiyetine dikkat çekmiştir. Bu çalışmada ise gerçekleştirilen analizler Yeşilirmak Deltası kıyı çizgisindeki önemli değişimleri ortaya çıkararak yaşanan erozyonun ciddiyetini koruduğunu göstermekte, önceki çalışmaları destekleyen daha güçlü kanıtlar sunmaktadır. Yeşilirmak Deltası'nda 37 yıllık bir zaman ölçeğinde erozyon ve birikim süreçleriyle ilgili kıyı dinamiklerinin LRR yöntemiyle belirlendiği bu çalışmada sekiz farklı tarihteki kıyı çizgisi konumu dikkate alınarak yıllık değişim oranları hesaplanmıştır. LRR yönteminin tüm zaman serisi verilerinin kullanımına olanak vermesi, geçici değişimlerin genel değişim oranı üzerindeki etkisini azaltması, literatürde kabul görmüş istatistiksel yöntemlere dayanması ve kıyı çizgisi değişim eğilimini gerçekçi bir bakış açısıyla vermesi nedeniyle birçok araştırmada (Aladwani, 2022; Basheer Ahammed ve Pandey, 2022; Islam ve Crawford, 2022) belirlenen kıyı çizgisi değişim oranının gelecekteki değişimler için de öngörü oluşturduğu belirtilmektedir. Yeşilirmak Nehri'nin batı kesiminde (Bölge-1) maksimum -25,8 m/yıl, doğu kesiminde (Bölge-2) maksimum -7,7 m/yıl erozyon belirlenmiş olup maksimum değerlere göre 37 yılda Bölge-1'de -954,6 m'yi Bölge-2'de ise -284,9 m'yi bulan karasal kayıp gerçekleşmiştir. Deltadaki mevcut koşulların devam etmesi durumunda önümüzdeki yıllarda da her yıl yaklaşık ortalama olarak Bölge-1'de (alanın %75'ini kapsayan) -8,5 m ve Bölge-2'de (alanın %49'unu kapsayan) -3,0 m erozyon gerçekleşebileceği öngörülmektedir. Elde edilen bulgular Bölge-1'deki erozyonun çok daha ciddi boyutta olduğunu kanıtlamaktadır. Bu durum Köle ve Ataol (2016), Atalay Dutucu (2016) ve Atalay Dutucu ve diğ. (2017) tarafından ifade edildiği gibi deltayı besleyen akarsu sediment miktarındaki azalmanın yanı sıra bölgede etkin olan kuzeybatı rüzgârlarına bağlı olarak gelişen dalga hareketleri ve kıyı akıntılarının nehir ağzının batısındaki erozyonu daha çok hızlandırdığını düşündürmektedir. Ayrıca kıyı çizgileri ve uydu görüntüleri üzerinde yapılan incelemede erozyonun özellikle Bölge-1'de sistematik olarak devam ettiği ve 2017–2022 periyodunda hızla DSİ drenaj kanalına ulaştığı görülmüştür. Bu durum drenaj kanalı ile deltadan ayrılan bölümün erozyon yönünden daha zayıf hale gelmesiyle açıklanabilir.

Bu çalışmada kıyı çizgisi değişimi Landsat-5 TM ve Landsat-8 OLI uydu görüntülerinden elde edilen kıyı çizgilerinin analiziyle belirlenmiştir. Landsat görüntülerinin çözünürlüğü çalışma açısından en önemli kısıt olmuştur. 30 m piksel boyutlu Landsat görüntülerinden elde edilen kıyı çizgilerinin konum belirsizliği 30,4 ila 32,3 m arasında hesaplanmıştır. Buna karşın Landsat görüntüleri orta çözünürlüklü uydu görüntüleri olmasına rağmen uzun vadeli kıyı çizgisi değişim belirleme çalışmaları için yeterli kabul edilmektedir (Liu ve diğ., 2017; Daud ve diğ., 2021). Ayrıca Landsat verilerinin ücretsiz edinilebilmesi ve geniş tarihsel arşiv sağlaması uzun zaman periyotlarındaki araştırmalar açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışmada da 37 yıllık bir periyotla geniş bir zaman aralığında gerçekleşen değişimler araştırıldığından ve deltada büyük değişimler yaşandığından Landsat uydu görüntüleri yeterli çözünürlük sağlamıştır.

Çalışma açısından diğer önemli kısıt kesitlerin oluşturulmasındaki subjektifliktir. Kesit yöntemi kıyı çizgilerinin yakınında bir ana hat çizilmesi ve ardından tüm kıyı çizgilerini kesecek şekilde kesitlerin çizilmesi için subjektif kararlar gerektirir. Kıyı çizgisi değişiminde mesafe kavramı, özellikle bir zaman noktasındaki kıyı çizgisi başka bir zaman noktasındaki kıyı çizgisine paralel olmadığında belirsiz hale gelir (Khallaghi ve Pontius Jr, 2022). Bu çalışmada LRR yöntemiyle kıyı çizgisi değişim oranlarının belirlenmesinde sekiz farklı yıla ait kıyı çizgisi kullanıldığından her kesit için tüm kıyı çizgilerinin kesitlere dik olması mümkün olmamıştır. Ayrıca kesitlerin tüm kıyı çizgilerini kesmesi gerektiğinden özellikle Bölge-2'de nehir ağzındaki konumsal değişimler nedeniyle kesitlerin oluşturulmasında sorun yaşanmıştır. Bu nedenle 1985–

2022 periyodunda deltada gerçekleşen alansal değişimler çakıştırma analiziyle belirlenerek birikim ile kazanılan ve erozyon ile kaybedilen alanlar hesaplanmıştır. Kıyı çizgisi değişiminin kıyı boyunca net mesafesi cinsinden sonuçlar vererek lokasyon bazlı öngörude bulunulmasına olanak sağlayan kesit yaklaşımının çoklu kıyı çizgilerinin kullanıldığı analizlerde özellikle nehir ağzı gibi radikal değişimlerin yaşandığı bölümlerde uygulanmasındaki zayıflığın çakıştırma analiziyle hesaplanacak alansal değişimlerle desteklenmesi gerektiği düşünülmektedir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Yeşilirmak Deltası'nın yaklaşık 18,5 km uzunluğundaki bölümünde 1985–2022 periyodundaki kıyı çizgisi değişimleri uzaktan algılama ve CBS ile belirlenmiştir. Kıyı çizgileri Landsat-5 TM ve Landsat-8 OLI uydu görüntülerinden otomatik olarak belirlenerek kıyı çizgisi değişim analizi LRR yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Deltanın incelenen bölümünün %34'ünde yüksek, %9'unda orta ve %18'inde düşük derecede erozyon belirlenmiş olup yıllık maksimum erozyon oranı Bölge-1'de -25,8 m/yıl ve Bölge-2'de -7,7 m/yıl'a ulaşmıştır. Kıyı erozyonu nedeniyle Bölge-1'de 179,23 ha, Bölge-2'de ise 82,22 ha alan kaybedilmiştir.

Elde edilen sonuçlar 37 yılda (1985–2022) deltanın ciddi bir erozyona uğradığını ve Bölge-1'deki etkinin çok daha yüksek olduğunu göstermiştir. Bu çalışmanın sonuçları, Yeşilirmak Deltası'nın kıyılarındaki erozyon sorunu hakkında güçlü kanıtlar sunmaktadır. Bu nedenle, Yeşilirmak Deltası kıyılarının sürdürülebilir yönetimi için kıyı çizgisi değişimlerinin düzenli aralıklarla sürekli olarak gözlemlenmesi gerektiği açıktır. Sonuçların kıyının erozyon ile karakterize olan bölümlerinin anlaşılmasında ve bölgesel kıyı yönetim planlarının oluşturulmasında rehberlik edeceği ve yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmanın sonuçları, uzun vadeli kıyı çizgisi değişimlerinin belirlenmesinde açık veri özelliğinde ve ücretsiz erişilen Landsat görüntülerinden yararlanılarak belirlenen kıyı çizgilerinden LRR yöntemiyle gerçekleştirilecek analizlerin etkinliğini göstermesi açısından da önemlidir. Bu kapsamda kıyı çizgisi değişimlerinin takibi ile kıyı morfolojisindeki değişimlerin izlenmesi gereken kritik alanlarda hızlı ve ekonomik olarak veri sağlanarak analizler gerçekleştirilebilir. Ancak kısa periyotlarda gerçekleşen küçük değişimlerin belirlenmesinin gerekli olduğu durumlarda daha yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin kullanılması önerilir. Burada kullanılan yaklaşım uzun vadeli kıyı çizgisi değişim analizlerinin yapılarak erozyon tehlikesinin belirlenmesi için farklı alanlarda da uygulanabilir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Derya Öztürk çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetiminde, veri toplama, analiz ve sonuçların yorumlanması süreçlerinde, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelemesi, son onay ve tam sorumluluk kısımlarında, Sibel Uzun çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetiminde, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelemesi, son onay ve tam sorumluluk kısımlarında katkı sağlamıştır.

KAYNAKLAR

1. Aladwani, N.S. (2022) Shoreline change rate dynamics analysis and prediction of future positions using satellite imagery for the southern coast of Kuwait: A case study. *Oceanologia*, 64(3), 417–432. doi:10.1016/j.oceano.2022.02.002
2. Atalay Dutucu, A. (2016) Yeşilirmak Deltası'nda jeomorfolojik değişiklikler ve gelecek ile ilgili öngörüler. *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul.
3. Atalay Dutucu A., Turoğlu, H. ve İkiel, C. (2017) Yeşilirmak Deltası kıyı çizgisi değişimine barajların etkisi. *70. Türkiye Jeoloji Kurultayı*, 10–14 Nisan 2017, Ankara.
4. Avcı, K.M., Erkal, T. ve San, B. T. (2003) Yeşilirmak Deltası kıyı çizgisi değişiminin uzaktan algılama ve coğrafi bilgi sistemleri yöntemi ile incelenmesi. *Maden Tetkik ve Arama (MTA), Rapor*, (10612).
5. Bağcı, H.R. ve Şahin, K. (2018) Yeşilirmak Deltasındaki (Samsun) turistik çekiciliklerin ulaşılabilirlik durumları. *International Geography Symposium on the 30th Anniversary of TUCAUM, 3–6 October 2018*, Ankara.
6. Baig, M.R.I., Ahmad, I.A., Shahfahad, Tayyab, M. ve Rahman, A. (2020) Analysis of shoreline changes in Vishakhapatnam coastal tract of Andhra Pradesh, India: an application of digital shoreline analysis system (DSAS). *Annals of GIS*, 26(4), 361–376. doi:10.1080/19475683.2020.1815839
7. Baral, R., Pradhan, S., Samal, R.N. ve Mishra, S.K. (2018) Shoreline change analysis at Chilika lagoon coast, India using digital shoreline analysis system. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(10), 1637–1644. doi:10.1007/s12524-018-0818-7
8. Basheer Ahammed, K.K. ve Pandey, A.C. (2022) Assessment and prediction of shoreline change using multi-temporal satellite data and geostatistics: A case study on the eastern coast of India. *Journal of Water and Climate Change*, 13(3), 1477–1493. doi:10.2166/wcc.2022.270
9. Bergillos, R.J., Rodríguez-Delgado, C., Millares, A., Ortega-Sánchez, M. ve Losada, M.A. (2016) Impact of river regulation on a Mediterranean Delta: Assessment of managed versus unmanaged scenarios. *Water Resources Research*, 52(7), 5132–5148. doi:10.1002/2015WR018395
10. Bombino, G., Barbaro, G., D'Agostino, D., Denisi, P., Foti, G., Labate, A. ve Zimbone, S.M. (2022) Shoreline change and coastal erosion: The role of check dams. First indications from a case study in Calabria, southern Italy. *Catena*, 217, 106494. doi:10.1016/j.catena.2022.106494
11. Burningham, H. ve Fernandez-Nunez, M. (2020) Shoreline change analysis. İçinde: *Sandy Beach Morphodynamics* (s. 439–460). Elsevier.
12. Cambers G. (2001) Coastal hazards and vulnerability. İçinde: *Professional Development Programme: Coastal Infrastructure Design, Construction and Maintenance - A Course in Coastal Zone/Island Systems Management*, Bölüm 4, 21 s.
13. Can, Ö. ve Taş, B. (2012) Ramsar alanı içinde yer alan Cernek Gölü ve sulak alanının (Kızılırmak Deltası, Samsun) ekolojik ve sosyo-ekonomik önemi. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 5(2), 1–11.
14. Chandrasekar, K., Sessa Sai, M.V.R., Roy, P.S. ve Dwevedi, R.S. (2010) Land Surface Water Index (LSWI) response to rainfall and NDVI using the MODIS Vegetation Index product. *International Journal of Remote Sensing*, 31(15), 3987–4005. doi:10.1080/01431160802575653
15. Chang, L., Cheng, L., Huang, C., Qin, S., Fu, C. ve Li, S. (2022) Extracting urban water bodies from Landsat imagery based on mNDWI and HSV transformation. *Remote Sensing*, 14(22), 5785. doi:10.3390/rs14225785

16. Chenthamil Selvan, S., Kankara, R.S., Markose, V.J., Rajan, B. ve Prabhu, K. (2016) Shoreline change and impacts of coastal protection structures on Puducherry, SE coast of India. *Natural Hazards*, 83(1), 293–308. doi:10.1007/s11069-016-2332-y
17. Choung, Y.J. ve Jo, M.H. (2017) Comparison between a machine-learning-based method and a water-index-based method for shoreline mapping using a high-resolution satellite image acquired in Hwado Island, South Korea. *Journal of Sensors*, 8245204, doi:10.1155/2017/8245204
18. Chu, D.T., Himori, G., Saito, Y., Bui, T.V. ve Aoki, S.I. (2015) Study of beach erosion and evolution of beach profile due to nearshore bar sand dredging. *Procedia Engineering*, 116, 285–292. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.292
19. Das, S.K., Sajan, B., Ojha, C. ve Soren, S. (2021) Shoreline change behavior study of Jambudwip island of Indian Sundarban using DSAS model. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 961–970. doi:10.1016/j.ejrs.2021.09.004
20. Daud, S., Milow, P. ve Zakaria, R.M. (2021) Analysis of shoreline change trends and adaptation of Selangor coastline, using Landsat satellite data. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49, 1869–1878. doi:10.1007/s12524-020-01218-0
21. Deepika, B., Avinash, K. ve Jayappa, K. (2014) Shoreline change rate estimation and its forecast: remote sensing, geographical information system and statistics-based approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 395–416. doi:10.1007/s13762-013-0196-1
22. Dolan, R., Fenster, M.S. ve Holme, S.J. (1991) Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 723–744.
23. Dutta, D., Kumar, T., Jayaram, C. ve Akram, W. (2022) Shoreline change analysis of hooghly estuary using multi-temporal Landsat data and Digital Shoreline Analysis System. İçinde: Zhang, Y. ve Cheng, Q. (editörler) *Geographic Information Systems and Applications in Coastal Studies*. IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.103030
24. Elfadaly, A., Abutaleb, K., Naguib, D.M. ve Lasaponara, R. (2022) Detecting the environmental risk on the archaeological sites using satellite imagery in Basilicata Region, Italy. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 25(1), 181–193. doi:10.1016/j.ejrs.2022.01.007
25. Feyisa, G.L., Meilby, H., Fensholt, R. ve Proud, S.R. (2014) Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23–35. doi:10.1016/j.rse.2013.08.029
26. Ford, M. (2011) Shoreline changes on an urban atoll in the Central Pacific Ocean: Majuro Atoll, Marshall Islands. *Journal of Coastal Research*, 28, 11–22.
27. Gonçalves, R.M., Saleem, A., Queiroz, H.A. ve Awange, J.L. (2019) A fuzzy model integrating shoreline changes, NDVI and settlement influences for coastal zone human impact classification. *Applied Geography*, 113, 102093. doi:10.1016/j.apgeog.2019.102093
28. <https://earthexplorer.usgs.gov/>, Erişim Tarihi: 12.12.2022, Konu: *Earth Explorer*.
29. <https://www.statology.org/standard-error-of-regression-slope/>, Erişim Tarihi: 26.08.2023, Konu: *Standard Error of A Regression Slope*.
30. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>, Erişim Tarihi: 12.12.2022, Konu: *Landsat Satellite Missions*.
31. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>, Erişim Tarihi: 01.01.2023, Konu: *Landsat Collection 2 Level-2 Science Products*.
32. Islam, M.S. ve Crawford, T.W. (2022) Assessment of spatio-temporal empirical forecasting performance of future shoreline positions. *Remote Sensing*, 14(24), 6364. doi:10.3390/rs14246364
33. Jackson Jr, C.W., Alexander, C.R. ve Bush, D.M. (2012) Application of the AMBUR R package for spatio-temporal analysis of shoreline change: Jekyll Island, Georgia, USA. *Computers & Geosciences*, 41, 199–207. doi:10.1016/j.cageo.2011.08.009

34. Karimi, M., Samani, J.M.V. ve Mazaheri, M. (2021) Shoreline spatial and temporal response to natural and human effects in Boujagh National Park, *Iran. International Journal of Sediment Research*, 36(5), 582–592. doi:10.1016/j.ijsrc.2021.02.004
35. Khallaghi, S. ve Pontius Jr, R. G. (2022) Area method compared with Transect method to measure shoreline movement. *Geocarto International*, 37(20), 5963–5984. doi:10.1080/10106049.2021.1926556
36. Köle, M.M. ve Ataoğlu, M. (2016) Yeşilirmak Deltası'nda 2000-2016 yılları arasında gözlenen kıyı erozyonu. Efe, R., Cürebal, İ., Levai, L. (editörler) *4th International Geography Symposium - GEOMED 2016 Book of Proceedings*.
37. Kudale, M.D. (2010) Impact of port development on the coastline and the need for protection. *Indian Journal of Geo-Marine Science*, 39(4), 597–604.
38. Kuleli, T. (2010) Kızılırmak ve Yeşilirmak Deltalarındaki kıyı değişimlerinin Landsat TM ve DSAS ile Belirlenmesi. *Türkiye'nin Kıyı ve Deniz Alanları VIII. Ulusal Kongresi Bildiriler Kitabı*.
39. Li, R., Liu, J.K. ve Felus, Y. (2001) Spatial modeling and analysis for shoreline change detection and coastal erosion monitoring. *Marine Geodesy*, 24(1), 1–12. doi:10.1080/01490410121502
40. Liu, Q., Trinder, J.C. ve Turner, I.L. (2017) Automatic super-resolution shoreline change monitoring using Landsat archival data: a case study at Narrabeen-Collaroy Beach, Australia. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(1), 016036. doi:10.1117/1.JRS.11.016036
41. Liu, Q. ve Trinder, J.C. (2018) Sub-pixel technique for time series analysis of shoreline changes based on multispectral satellite imagery. İçinde: Marghany, M (editör) *Advanced Remote Sensing Technology for Synthetic Aperture Radar Applications, Tsunami Disasters, and Infrastructure*. IntechOpen.
42. Martínez, C., Grez, P.W., Martín, R.A., Acuña, C.E., Torres, I. ve Contreras-López, M. (2022) Coastal erosion in sandy beaches along a tectonically active coast: The Chile study case. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 46(2), 250–271. doi:10.1177/0309133321105719
43. 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(7), 1425–1432. doi:10.1080/01431169608948714
44. McFeeters, S.K. (2013) Using the normalized difference water index (NDWI) within a geographic information system to detect swimming pools for mosquito abatement: a practical approach. *Remote Sensing*, 5(7), 3544–3561. doi:10.3390/rs5073544
45. Murray, J., Adam, E., Woodborne, S., Miller, D., Xulu, S. ve Evans, M. (2023) Monitoring shoreline changes along the Southwestern Coast of South Africa from 1937 to 2020 using varied remote sensing data and approaches. *Remote Sensing*, 15(2), 317. doi:10.3390/rs15020317
46. O'Brien, K., Stocker, J., Barrett, J. ve Hyde, B. (2014) Analysis of shoreline change in Connecticut: 100+ years of erosion and accretion: methodology and summary results. *A cooperative effort between the Connecticut Department of Energy & Environmental Protection (DEEP), the Connecticut Sea Grant (CT Sea Grant) and the University of Connecticut Center for Land Use Education and Research (UConn-CLEAR)*.
47. Oyedotun, T.D. (2014) Shoreline geometry: DSAS as a tool for historical trend analysis. İçinde: *Geomorphological Techniques*, Bölüm 3(2.2), s.1–12.
48. Ozturk, D., Beyazit, I. ve Kilic, F. (2015) Spatiotemporal analysis of shoreline changes of the Kizilirmak Delta. *Journal of Coastal Research*, 31(6), 1389–1402. doi:10.2112/JCOASTRES-D-14-00159.1
49. Ozturk, D. ve Sesli, F.A. (2015) Shoreline change analysis of the Kizilirmak Lagoon Series. *Ocean & Coastal Management*, 118, 290–308. doi:10.15244/pjoes/58765

50. Reddy, G.O. (2018) Spatial data management, analysis, and modeling in GIS: principles and applications. İçinde: Reddy, G., Singh, S. (editörler) *Geospatial Technologies in Land Resources Mapping, Monitoring and Management*, cilt 21, s.127–142. Geotechnologies and the Environment, Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-78711-4_7
51. Salghuna, N.N. ve Bharathvaj, S.A. (2015) Shoreline change analysis for northern part of the Coromandel coast. *Aquatic Procedia*, 4, 317–324. doi:10.1016/j.aqpro.2015.02.043
52. Singh, K.V., Setia, R., Sahoo, S., Prasad, A. ve Pateriya, B. (2015) Evaluation of NDWI and MNDWI for assessment of waterlogging by integrating digital elevation model and groundwater level. *Geocarto International*, 30(6), 650–661. doi:10.1080/10106049.2014.965757
53. Singh, S., Bhat, J.A., Shah, S. ve Pala, N.A. (2021) Coastal resource management and tourism development in Fiji Islands: A conservation challenge. *Environment, Development and Sustainability*, 23(3), 3009–3027. doi:10.1007/s10668-020-00764-4
54. Sowmya, K., Sri, M.D., Bhaskar, A.S. ve Jayappa, K.S. (2019) Long-term coastal erosion assessment along the coast of Karnataka, west coast of India. *International Journal of Sediment Research*, 34(4), 335–344. doi:10.1016/j.ijsrc.2018.12.007
55. Süzen, M.L. ve Özhan, E. (2003) Monitoring shoreline changes at Yesilirmak Delta by remote sensing and GIS. *Proceedings of the Sixth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment, MEDCOAST 03*, 7–11 October 2003, Ravenna, Italy.
56. Tarım ve Orman Bakanlığı (2022) *Ulusal Öneme Haiz Sulak Alanlar*. <https://www.tarimorman.gov.tr/DKMP/Belgeler/Korunan%20Alanlar%20Listesi/3-%20sulak%20alanlar.pdf> (Erişim Tarihi: 26.08.2023)
57. Tsoukala, V.K., Katsardi, V., Hadjibiros, K. ve Moutzouris, C.I. (2015) Beach erosion and consequential impacts due to the presence of harbours in sandy beaches in Greece and Cyprus. *Environmental Processes*, 2(1), 55–71. doi:10.1007/s40710-015-0096-0
58. Uğurlu, S., Polat, N. ve Kandemir, Ş. (2008) Kızılırmak ve Yeşilirmak Deltalarındaki (Samsun) Lagün Göllerinin Balık Faunası. *Journal of FisheriesSciences.com*, 2(3), 475–483. doi:10.3153/jfsc.com.mug.200742
59. Vallarino Castillo, R., Negro Valdecantos, V. ve Moreno Blasco, L. (2022) Shoreline change analysis using historical multispectral Landsat images of the Pacific Coast of Panama. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(12), 1801. doi:10.3390/jmse10121801
60. Van Rijn, L.C. (2011) Coastal erosion and control. *Ocean & Coastal Management*, 54(12), 867–887. doi:10.1016/j.ocecoaman.2011.05.004
61. Wang, H., Xu, D., Zhang, D., Pu, Y. ve Luan, Z. (2022) Shoreline dynamics of chongming island and driving factor analysis based on Landsat images. *Remote Sensing*, 14(14), 3305. doi:10.3390/rs14143305
62. 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(14), 3025–3033. doi:10.1080/01431160600589179
63. Yadav, A., Dodamani, B.M. ve Dwarakish, G.S. (2021) Shoreline analysis using Landsat-8 satellite image. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 27(3), 347–355. doi:10.1080/09715010.2018.1556569
64. Yang, X., Zhao, S., Qin, X., Zhao, N. ve Liang, L. (2017) Mapping of urban surface water bodies from Sentinel-2 MSI imagery at 10 m resolution via NDWI-based image sharpening. *Remote Sensing*, 9(6), 596. doi:10.3390/rs9060596
65. Yılmaz, C. (2005) Kızılırmak Deltasında meydana gelen erozyonun coğrafi analizi. *Türkiye Kuvaterner Sempozyumu*, 2–5 Haziran 2005, İstanbul.
66. Zanutta, A., Lambertini, A. ve Vittuari, L. (2020) UAV photogrammetry and ground surveys as a mapping tool for quickly monitoring shoreline and beach changes. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 52. doi:10.3390/jmse8010052

67. Zeybek, H.İ., Bağcı, H.R. ve Bahadır, M. (2018) Yeşilirmak Deltasında (Samsun) kıyı çizgisi değişimlerinin Bruun kuralına göre değerlendirilmesi. *TURQUA 2018 Türkiye Kuvaterner Sempozyumu*, 2-5 Mayıs 2018, İstanbul.
68. Zhang, A., Yang, Y., Chen, T., Liu, J. ve Hu, Y. (2021) Exploration of spatial differentiation patterns and related influencing factors for National Key Villages for rural tourism in China in the context of a rural revitalization strategy, using GIS-based overlay analysis. *Arabian Journal of Geosciences*, 14, 1-15. doi:10.1007/s12517-020-06381-9
69. Zhou, Y., Dong, J., Xiao, X., Xiao, T., Yang, Z., Zhao, G., Zou, Z. ve Qin, Y. (2017) Open surface water mapping algorithms: A comparison of water-related spectral indices and sensors. *Water*, 9(4), 256. doi:10.3390/w9040256