



Kızılırmak Deltası Kıyı Çizgisinin EPR ve LRR Yöntemleriyle 1984–2022 Periyodunda Değişim Analizi ve 2030 Yılı Tahmini

Analysis of shoreline changes in Kızılırmak Delta using EPR and LRR methods for the period 1984–2022, and prediction for the year 2030

Derya Öztürk^{*a}, Sibel Uzun^b

Makale Bilgisi

Araştırma Makalesi

DOI:

10.33688/aucbd.1310132

Makale Geçmişi:

Geliş: 05.06.2023

Kabul:12.07.2023

Anahtar Kelimeler:

Kıyı çizgisi değişimi

Kıyı erozyonu

Kıyı çizgisi tahmini

EPR

LRR

Öz

Kıyı çizgisindeki değişimlerin belirlenmesi, değişimlerin nedenlerinin araştırılması ve gelecek tarihlere yönelik tahminler, kıyı yönetimi açısından büyük bir önem taşımaktadır. Bu çalışmanın amacı Kızılırmak Deltasında 8 km uzunluğundaki bölgede 1984–2022 periyodunda gerçekleşen kıyı çizgisi değişimlerinin analizi ve 2030 yılı için kıyı çizgisinin konumunun tahmin edilmesidir. Çalışmada 1984, 1990, 1996, 2002, 2008, 2015 ve 2022 yıllarına ait Landsat-5 TM/Landsat-8 OLI/Landsat-9 OLI-2 uydu görüntüleri kullanılarak kıyı çizgileri belirlenmiş, EPR ve LRR yöntemleriyle yıllık kıyı çizgisi değişim oranları hesaplanmıştır. 1984–2022 periyodunda EPR yöntemiyle ortalama -7,0 m/yıl ve maksimum -16,2 m/yıl, LRR yöntemiyle ortalama -7,5 m/yıl ve maksimum -19,6 m/yıl erozyon hızı belirlenmiştir. Erozyonla kaybedilen alan 201,40 ha olup, 8 km kıyının EPR yöntemine göre % 57'si, LRR yöntemine göre % 50'si yüksek erozyon derecesi taşımaktadır. Çalışmanın sonuçları kıyı koruma yapılarının erozyonu tam olarak engelleyemediğini göstermiştir. Gerekli önlemlerin alınmaması durumunda 2030 yılına kadar -270,8 m'yi bulabilecek erozyon nedeniyle 51,48 ha alanın kaybolacağı öngörülmektedir.

Article Info

Research Article

DOI:

10.33688/aucbd.1310132

Article History:

Received:05.06.2023

Accepted:12.07.2023

Keywords:

Shoreline change

Coastal erosion

Shoreline prediction

EPR

LRR

Abstract

Determining shoreline changes, investigating the reasons for these changes, and making predictions for the future are of great importance for coastal management. The aim of this study is to analyze shoreline changes in an 8 km-long region of the Kızılırmak Delta during the period 1984–2022 and predict the shoreline for the year 2030. The shorelines were determined using Landsat-5 TM/Landsat-8 OLI/Landsat-9 OLI-2 satellite images of 1984, 1990, 1996, 2002, 2008, 2015 and 2022. Annual shoreline change rates were calculated using the EPR and LRR methods. For the period 1984–2022, EPR revealed an average erosion rate of -7.0 m/year, with a maximum erosion rate of -16.2 m/year. LRR showed an average erosion rate of -7.5 m/year, with a maximum erosion rate of -19.6 m/year. The total area lost due to erosion was 201.40 hectares, and 57% of the 8 km coast according to EPR and 50% according to LRR showed high degree of erosion. The results revealed that the coastal protection structures could not completely prevent the erosion. Without necessary precautions, it is predicted that an additional 51.48 hectares of area may be lost due to erosion by 2030, potentially reaching depths of -270.8 m.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: dozturk@omu.edu.tr

^a Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Samsun/Türkiye, <http://orcid.org/0000-0002-0684-3127>

^b Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Samsun/Türkiye, <http://orcid.org/0000-0001-5814-7054>

1. Giriş

Kıyı çizgisi kara ve su arasındaki sınırdır. Kıyı çizgisinin konum değişimleri son yıllarda dünya çapında kıyı bölgelerini etkileyen önemli çevre sorunları arasında yer almaktadır (Dey ve Jena, 2021). Akarsularla sediman taşınımı, deniz seviyesindeki değişimler, kıyı akıntıları, rüzgâr, gelgit ve dalgalar gibi çeşitli faktörler kıyı çizgisinde kısa ve uzun vadeli değişimlere neden olur (Aladwani, 2022; Ankrah vd., 2022). Bu değişimler kıyı alanlarında ve ekosisteminde önemli değişimler yaratabildiğinden kıyıların doğal ortamı, insan yaşamı ve mülkiyeti için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır (Dey ve Jena, 2021). Bu nedenle kıyı çizgisi değişimlerinin takibi kıyı risk yönetimi ve planlamasında çok önemli bir rol oynar (Guerrera vd., 2021). Kıyılardaki erozyon ve birikimlerin kantitatif yöntemlerle belirlenmesi, kıyı çizgisi değişimlerinin izlenmesi, kıyı süreçlerinin anlaşılması ve kıyı yönetimi açısından büyük bir önem taşımaktadır (Aladwani, 2022; Dey ve Jena, 2021).

“Kıyı çizgisi” terimi 1800’lerde kullanılırken (Gulliver, 1899), “kıyı çizgisi değişimi” terimi 1960’larda ortaya çıkmıştır (Athearn ve Ronne, 1963). Birleşik terim olan “kıyı çizgisi değişim analizi” ise ilk olarak 1970’lerin sonlarında bilimsel makalelerde yer almaya başlamıştır (Ankrah vd., 2022; Tanner, 1978). Kıyı çizgisi değişim analizi, belirlenen periyotta bir dizi kıyı çizgisinden toplam değişim miktarları ve yıllık değişim oranlarının hesabına dayanmaktadır (Burningham ve Fernandez-Nunez, 2020; Dereli ve Tercan, 2020; Li vd., 2001). Kıyı çizgisi değişim analizi sürecinde kıyı çizgilerinin belirlenmesinde temel veri kaynakları; mevcut haritalar, yersel ölçmeler, Lidar, hava fotoğrafları ve uydu görüntüleridir (Aladwani, 2022; Ankrah vd., 2022; Li vd., 2001; Liu ve Trinder, 2018). Bu veri kaynaklarının her birinin güçlü ve zayıf yönleri bulunmaktadır. Bu nedenle kullanılacak veriler; verilerin mevcudiyeti, çalışma alanının büyüklüğü, veri edinim maliyeti ve süresi, verinin çalışma için yeterli doğruluk düzeyinde olması koşullarına bağlı olarak değişmektedir (Ankrah vd., 2022; Atkinson, 2001; Boak ve Turner, 2005). Haritalar için güncellik sorunu ve değişim belirleme çalışmaları için gerekli olan çoklu zamansal ölçeklerde haritaların elde edilmesindeki zorluklar önemli kısıtlardandır. Bununla birlikte, klasik yersel ölçmeler, özellikle geniş çalışma alanları söz konusu olduğunda çok yoğun iş gücü gerektiren, maliyetli ve zaman alıcı bir işlemdir (Aladwani, 2022). Yüksek çözünürlüklü hava fotoğrafları ve Lidar teknikleri ile topoğrafik ayrıntılar detaylı olarak elde edilebildiğinden kıyı çizgilerinin yüksek hassasiyetle tespit edilebilmesine karşın periyodik uçuşlar ve veri analizleri, kıyı çizgilerinin güncellenmesi için yüksek bir maliyet gerektirmektedir (Esmail vd., 2019). Uzaktan algılama ise kıyı çizgisi değişim analizi için geniş coğrafi ve zamansal kapsamı, özellikle su-kara arayüzünün iyi tanımlandığı kızılötesi spektral bantlara sahip çok bantlı uydu görüntüleri sağlama olanakları ile kıyı çizgisi değişimlerinin belirlenmesinde etkin bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır (Dutta vd., 2022; Nikolakopoulos vd., 2019). Ayrıca farkı çözünürlük düzeylerinde çok sayıda uydu görüntüsü alternatifi, ücretsiz ve açık veri özelliğindeki çeşitli uydu görüntülerine erişim olanakları, uzaktan algılama ve Coğrafi Bilgi Sistemlerinin (CBS) entegrasyonu ile mekânsal analizlerin etkin olarak yürütülerek güvenilir ve tutarlı bilgi elde edilebilme olanakları, kıyı çizgisi konumunun değerlendirilmesi ve değişimlerin izlenmesinde uydu görüntülerinin kullanımını cazip kılmaktadır (Aladwani, 2022; Deepika vd., 2014; Esmail vd., 2019).

Kıyı çizgisi değişim analiz yöntemleri, kıyı çizgisindeki mekânsal değişimleri (konumsal değişim ve miktar) belirlemek için kullanılan matematiksel/istatistiksel yöntem ve yaklaşımları ifade

etmek için kullanılan geniş bir tanımlardır (Burningham ve Fernandez-Nunez, 2020). Kıyı çizgisi değişim analizinde SCE (Shoreline Change Envelope), NSM (Net Shoreline Movement), EPR (End Point Rate) ve LRR (Linear Regression Rate) yöntemleri araştırmacılar tarafından en yaygın kullanılan tekniklerdir (Awad ve El-Sayed, 2021; Bheeroo vd., 2016; Warnasuriya vd., 2018; Weerasingha ve Ratnayake, 2022; Zagórski vd., 2020). SCE ve NSM, incelenen periyottaki değişim miktarını, LRR ve EPR ise incelenen periyotta belirlenen bir zamansal ölçek için (örneğin yıllık, aylık vb.) değişim oranının hesaplanmasında kullanılır (Murray vd., 2023; Oyedotun, 2014). EPR hızlı ve hesaplamasının çok kolay olduğu bir yöntemdir. Diğer yandan LRR'nin tamamen kabul edilen istatistiksel konseptte dayalı olması nedeniyle daha güvenilir olduğu kabul görmektedir (Dey ve Jena, 2021). Bu istatistiksel algoritmalar ve kıyı çizgisi değişim analizindeki uygulamaları Thieler vd. (2009) ve Himmelstoss vd. (2018)'de ayrıntılı olarak tartışılmaktadır.

Kıyı çizgisi değişimini zamanın veya deniz seviyesinin bir fonksiyonu olarak tahmin etmek için çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Bu amaçla kullanılan bazı doğrusal olmayan yöntemler, yüksek dereceli polinom, üstel veya döngülü seriler gibi karmaşık matematiksel modellere dayalıdır (Li vd., 2001). Kıyı araştırmalarında gelecekteki bir tarih için kıyı çizgisini tahmin etmek için en yaygın kullanılan yöntem ise sabit bir değişim oranının ekstrapolasyonudur (Basheer Ahammed ve Pandey, 2022; Islam ve Crawford, 2022; Mukhopadhyay vd., 2012). Bu yöntemin popülaritesi temel olarak basitliğinden kaynaklanmaktadır. Herhangi bir ampirik teknikte olduğu gibi hidrodinamik parametreler, kıyı yapıları ve dip özellikleri ile ilgili herhangi bir bilgi veya teori gerektirmez (Esmail vd., 2019; Li vd., 2001). Bunun yerine, tüm temel süreçlerin kümülatif etkisinin konumsal değişimin geçmişinde yakalandığı varsayılır (Li vd., 2001). Bu bağlamda kıyı çizgisi değişim oranlarının belirlenmesinde kullanılan EPR ve LRR yöntemleri kıyı çizgisinde gelecekte oluşabilecek zamansal değişimlerin tahmininde de güvenilir ve basit bir yol olarak kabul edilmektedir (Ahammed ve Pandey, 2022; Aladwani, 2022; Basheer Islam ve Crawford, 2022; Fenster vd., 1993).

Delta ovaları, nehirlerin ağız kısımlarında alüvyonların birikmesi ile oluşmuş kıyı ovalarıdır (Yılmaz, 2005). Deltalar sedimantolojik açıdan oldukça aktif bölgeler olduğundan önemli kıyı çizgisi değişimlerine maruz kalmaktadır (Anthony, 2015; Köle ve Ataol, 2016). Türkiye'nin en geniş üçüncü büyük kıyı ovası olan Kızılırmak Deltası, yaklaşık olarak 78600 km² havza alanına sahip Kızılırmak Nehrinin getirdiği yüklü alüvyonlarla hızlı bir büyüme göstermiştir (Yılmaz, 2005; Turoğlu, 2010; Can ve Taş, 2012; Ataol ve Köle, 2016). Ancak son dönemlerde Kızılırmak üzerinde inşa edilen barajlar, kıyı ve deltayı besleyen akarsuların yataklarından kum ve çakıl alımı gibi nedenlerle Kızılırmak Deltasının sediman bütçesi açık vermeye başlamıştır. Başlangıçta deltanın büyümesi durmuş, daha sonra ise delta kıyı erozyonuyla alan kaybetmeye başlamıştır (Turoğlu, 2010; Zeybek vd., 2018). Yapılan çok sayıda araştırma (Ataol ve Köle, 2016; Ozturk vd., 2015; Sertel vd., 2008; Uzun, 2005; Yılmaz, 2005; Zeybek vd., 2011; Zeybek vd., 2018) özellikle deltaya yakın Altinkaya ve Derbent Barajlarının inşasının ardından son 30 yılda deltada yaşanan dramatik gerilemeye dikkat çekmişlerdir. Hay (1994) Kızılırmak Nehrinin üzerinde hiçbir baraj bulunmadığı dönemlerde (1959 yılına kadar) yıllık 23 milyon ton sediment taşınırken Hirfanlı Barajının inşasından sonra bu değer yıllık 18 milyon tona, Altinkaya ve Derbent Barajlarından sonra ise yıllık 0,46 milyon tona düştüğünü

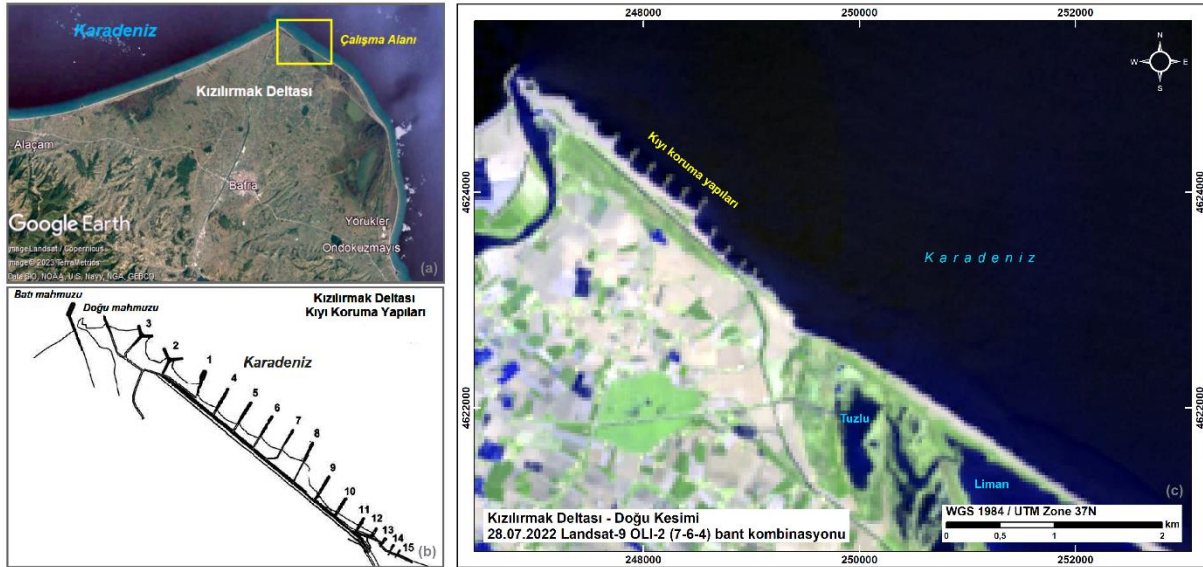
belirtmiştir. Zeybek vd. (2011) ise 2008 yılı itibarıyla taşınan sedimentin yıllık 0,30 milyon tona gerilediğini ifade etmiştir.

Kızılırmak Deltasında kıyı erozyonunu önlemek için çok sayıda kıyı yapısı inşa edilmiş ancak kıyı yapıları nedeniyle de doğal akıntı düzeni bozularak kıyı çizgisinde önemli değişimler gerçekleşmiştir (Zeybek vd., 2018). Deltadaki erozyon tehlikesi nedeniyle uzun yıllardır birçok bilimsel çalışmada kıyı çizgisindeki değişimler araştırılmıştır. İlk çalışmalar genel olarak hava fotoğrafları, haritalar, deltada yaşayan insanlarla yapılan görüşmeler ve arazi gözlemlerine dayalı olarak gerçekleştirilmiştir (Uzun, 2005; Yılmaz, 2005; Yüksek, 2008). Daha sonra uzaktan algılama teknolojisinin kullanımının yaygınlaşmasıyla uydu görüntülerinden uzun zaman periyotlarında meydana gelen değişimlerin araştırıldığı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Sertel vd. (2008), 1987–2004 periyodu için uydu görüntülerinden ekrandan sayısallaştırma yöntemiyle kıyı çizgilerini elde ederek kıyı değişimlerini araştırmıştır. Turoğlu (2010), 1980 ve 2005 yılı uydu görüntülerini 1926 tarihli bir topoğrafik harita ile karşılaştırmıştır. Kuleli vd. (2011), 1989, 1999 ve 2009 yılı uydu görüntülerinden su indeksi algoritması ile kıyı çizgilerini belirleyerek EPR ve ağırlıklı LRR yöntemleriyle kıyı çizgisi değişimlerini hesaplamıştır. Ozturk vd. (2015) 1987–2011 periyodunda beş farklı tarih için uydu görüntülerinden bant oranlama ve histogram eşikleme algoritmalarıyla kıyı çizgilerini elde ederek SCE, EPR ve LRR yöntemleriyle kıyı çizgisi değişimlerini incelemiştir. Ozturk ve Sesli (2015) 1962–2013 periyodunda topoğrafik haritalardan sayısallaştırma ve uydu görüntülerinden su indeksleri yardımıyla kıyı çizgilerini belirleyerek NSM, SCE ve EPR yöntemleriyle değişimi araştırmışlardır. Ataol vd. (2017) 1951–2017 periyodunda topoğrafik haritalar, hava fotoğrafları ve uydu görüntülerinden sayısallaştırma ile kıyı çizgilerini elde ederek NSM, EPR ve LRR yöntemleriyle kıyı çizgisi değişimlerini tespit etmişlerdir. Yapılan çalışmaların ortak sonucu, Kızılırmak Deltası kıyı çizgisinde karaya doğru ciddi boyutta bir gerilemenin meydana geldiği ve bu gelişen kıyı erozyonundan en çok etkilenen bölgenin nehir ağzının doğusundaki kıyı şeridi olduğudur. Yapılan araştırmalarda gerçekleşen erozyon belirlenerek muhtemel tehlikelere işaret edilmesine karşın kıyı çizgisinin gelecek tarihteki olası konumu için kantitatif analizler gerçekleştirilmemiştir. Bununla birlikte literatürde kıyı çizgisi konumunun tahmini ile ilgili araştırmalar da sınırlıdır (Aladwani, 2022; Awad ve El-Sayed, 2021; Deepika vd., 2014; Kumar vd., 2010; Nandi vd., 2016).

Bu çalışmanın temel amacı, Kızılırmak Deltasının kıyı erozyonundan en fazla etkilenen doğu kesiminde (nehir ağzından itibaren yaklaşık 8 km) gelecekteki geliştirme faaliyetlerinde daha iyi yönetim planlamasının yapılabilmesi için uzaktan algılama, CBS ve istatistiksel tekniklerin uygulanmasıyla kantitatif olarak kıyı çizgisi değişimlerinin belirlenmesi ve kıyı çizgisinin gelecekteki olası konumunun tahmin edilmesidir. Bu amaçla çalışmada, 38 yıllık bir periyotta yedi tarihe (1984, 1990, 1996, 2002, 2008, 2015 ve 2022) ait Landsat uydu görüntüleri kullanılmıştır. 1984–2022 periyodundaki kıyı çizgisi değişimleri EPR ve LRR yöntemleriyle analiz edilmiş ve kıyı çizgisi değişimlerinin istatistiksel analizine dayalı olarak 2030 yılı için kıyı çizgisi konumunun tahmini yapılmıştır.

2. Çalışma Alanı

Kızılırmak Deltası (Şekil 1a), Türkiye'nin Karadeniz kıyılarında ve Orta Karadeniz Bölümünde yer almakta olup Samsun ilinin idari sınırları içerisinde bulunmaktadır. Deltada Samsun'un Ondokuzmayıs, Bafra ve Alaçam ilçe merkezleri yer alır. Doğuda Engiz Çayı, batıda Alaçam Deresi, güneyde Derbent Barajı ile sınırlanmakta ve Karadeniz'e 69 km kıyısı bulunmaktadır (Zeybek vd., 2018). Kızılırmak Nehrinin taşıdığı alüvyonlarla oluşan Kızılırmak Deltasının yüzölçümü 56000 ha'dır. Bu alanın 11000 ha kısmı sulak alandır (Tabiat Varlıklarını Koruma Genel Müdürlüğü, 2019; Zeybek vd., 2018). Deltanın özellikle doğu kıyılarında yer alan kıyı kordonları ve lagünler, delta üzerindeki en önemli morfolojik birimler arasındadır. Bu lagünler, kıyı kordonları vasıtasıyla denizden ayrılmıştır (Can ve Taş, 2012). Kızılırmak Deltasının doğal hayatı korumaya yönelik I., II. ve III. Derece Doğal Sit Alanı, Yaban Hayatı Geliştirme Sahası ve Ramsar Alanı statüleri bulunmaktadır (Tabiat Varlıklarını Koruma Genel Müdürlüğü, 2019). Çok sayıda nesli tehlike altında olan bitki ve hayvan türüne ev sahipliği yapan Kızılırmak Deltası, sulak alan ekosistemi ve biyolojik çeşitlilik açısından zengin olup doğal fiziki ortam özellikleri, verimli toprakları, coğrafi konumu ve ulaşım kolaylığı ile insan yaşamı için daima cazip imkânlar sunmuştur (Can ve Taş, 2012; Sirat vd., 2012; Turoğlu, 2010). Sulak alan çevresinde yaşayan insanların temel geçim kaynakları tarım, hayvancılık, balıkçılık ve saz üretimidir (Sirat vd., 2012; Turoğlu, 2010).



Şekil 1. Çalışma alanı.

Kızılırmak Deltası antropojenik baskıya maruz bir alandır. Deltayı besleyen Kızılırmak Nehri ve yan kolları üzerinde enerji, taşkın kontrolü ve sulama amacıyla 125 adet baraj ve gölet inşa edilmiştir. 1959 yılında işletmeye açılan Hirfanlı Barajı ve daha sonraki yıllarda inşa edilerek işletmeye açılan Altınkaya (1988), Kapulukaya (1989), Derbent (1990), Gelingüllü (1994), Yamula (2007), Obruk (2007), Bayramhacılı (2011) ve Boyabat (2012) barajları havzadaki baraj gölü hacmi en fazla olan önemli barajlardır. Barajlar nedeniyle Kızılırmak Deltasına ulaşan sediment büyük oranda azalmış (Ataol ve Köle, 2016; Yılmaz, 2005), kıyı akıntısı ve dalga erozyonunun etkisiyle nehrin ağız

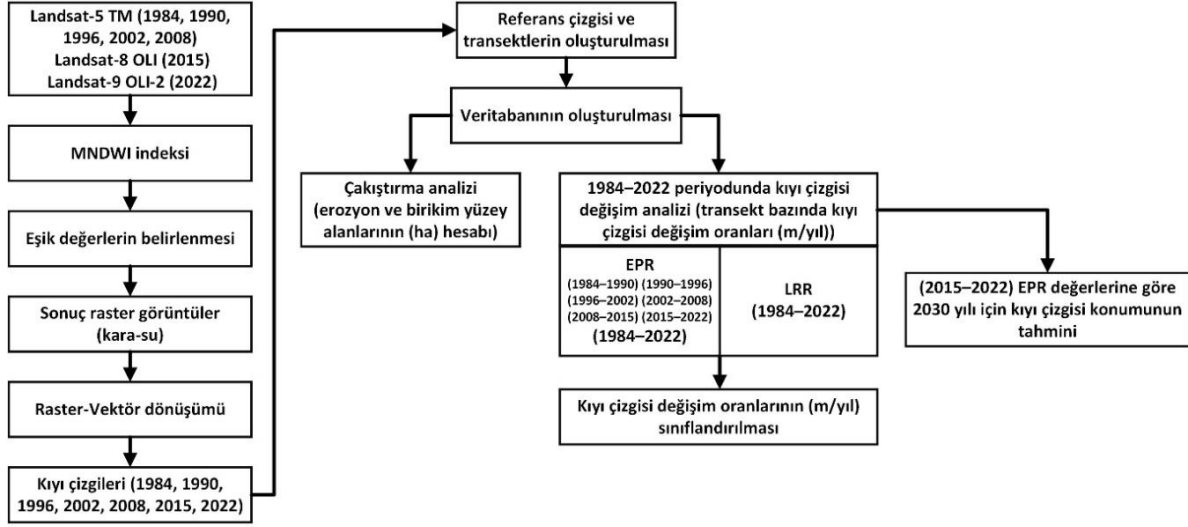
kısından itibaren deltada gerileme başlamıştır (Turoğlu, 2010; Yılmaz, 2005). Deltadaki gerileme, tarım alanlarını ve Devlet Su İşlerinin deltanın doğu kesiminde yer alan tarım alanlarındaki fazla suyu toplayarak denize tahliye etme amacıyla 1991–1992 yıllarında inşa ettiği kuşaklama kanalını da tehdit etmiştir (Ataol ve Köle, 2016; Yılmaz, 2005). Kuşaklama kanalının ağız kısmı tahrip olmuş, buradan içeriye deniz suyu girmeye başlamıştır. Kuşaklama kanalının işlevini kaybetme tehlikesi ile karşı karşıya kalınması ve deltanın gerilemesinden kaynaklanan diğer riskler nedeniyle kıyı erozyonunu önlemek için 1999 yılında mahmuz inşası (Şekil 1b) başlamıştır (Yılmaz, 2005). Mahmuz 1 (I şeklinde-düz) ve mahmuz 2 ve 3 (Y şeklinde) 1999’da tamamlanmıştır. 2002 yılında nehir ve denizin birleştiği yeri düzenlemek için Batı mahmuzu (J şeklinde) ve Doğu mahmuzu (I şeklinde) ve 1 nolu mahmuzunun doğusunda beş adet mahmuz (I şeklinde) yapılmıştır (Özdemir, 2010; Zeybek vd., 2011). Ancak yapılan mahmuzlar kendi bölgelerinde erozyonu azaltırken erozyonun daha doğuya taşınmasına neden olmuştur (Yüksek, 2008). Bu nedenle, 2010 yılında 8. mahmuzun doğusunda yedi adet daha mahmuz (I şeklinde) inşa edilmiştir (Ataol ve Köle, 2016). Kızılırmak Deltasının erozyondan en fazla etkilenen ve kıyı koruma yapılarının inşa edildiği bu bölümü de kapsayan nehir ağızından itibaren doğu yönünde yaklaşık 8 km kıyı bu çalışmanın araştırma alanını oluşturmaktadır (Şekil 1c).

3. Metodoloji

Kızılırmak Deltasında inceleme alanında, 1984–2022 periyodunda gerçekleşen kıyı çizgisi değişimlerinin analizleri ve 2030 yılı için kıyı çizgisi tahmininin gerçekleştirilmesinde Landsat-5 TM/Landsat-8 OLI/Landsat-9 OLI-2 uydu görüntüleri kullanılmıştır. Uydu görüntülerinin tarihleri mümkün olduğunca eşit aralıklı periyotlar oluşturacak şekilde ve deltadaki kıyı koruma yapılarının inşa tarihleri dikkate alınarak belirlenmiştir. 1984–1990 ve 1990–1996 periyotlarındaki analizlerle Altınkaya ve Derbent barajlarının deltaya olan etkisi araştırılırken, 1996–2002 periyodundaki analizlerle kıyıda ilk aşamada inşa edilen üç adet mahmuzun, 2002–2008 periyodundaki analizlerde daha sonradan eklenen yedi adet mahmuzun (doğu ve batı mahmuzları ve 4–8 nolu mahmuzlar), 2008–2015 periyodunda son eklenen yedi adet mahmuzun delta kıyılarındaki etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. 2015–2022 periyodunda tüm mahmuzların tamamlanmasından sonra gerçekleşen değişimler ve 1984–2022 periyodunda baraj ve mahmuzların deltada meydana getirdiği değişimlerin birleşik sonuçlarının incelenmesi hedeflenmiştir.

Uydu görüntülerinden kıyı çizgilerinin çıkarımında MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) su indeksi algoritması kullanılmış ve görüntülerde bilinen pikseller yardımıyla eşik değerler belirlenerek MNDWI indeks görüntüsü kara ve su olarak sınıflandırılmıştır. Sonuç raster görüntüler vektör forma dönüştürülerek analizlerde kullanılacak kıyı çizgileri elde edilmiştir. Kıyı çizgisi değişim analizleri için tüm kıyı çizgilerine yaklaşık paralel olacak bir referans çizgisi ve bu referans çizgisine dik olacak şekilde 50 m aralıklarla 153 adet transekt oluşturulmuştur. Transektlerin bütün kıyı çizgileri ile kesişim noktaları belirlenerek referans çizgisinden olan uzaklıklar veri tabanına kaydedilmiştir. Kıyı çizgisi değişim analizleri EPR ve LRR yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiş, kıyı çizgisi değişim oranları erozyon ve birikim derecesi açısından sınıflandırılmıştır. Kıyı çizgileri esas alınarak gerçekleştirilen çakıştırma (overlay) analizi ile erozyon ve birikim alanlarının yüzölçümleri hesaplanmıştır. 2015–2022 periyodunda EPR ile belirlenen kıyı

çizgisi değişim oranlarına göre 2030 yılı için kıyı çizgisinin konumunun tahmini yapılmıştır. Kıyı çizgilerinin çıkarımı, kıyı çizgisi değişimlerinin analizi ve tahmin çalışmaları ArcGIS 10.0 yazılımı kullanılarak CBS ortamında gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ana işlem adımları Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çalışmanın ana işlem adımları.

3.1. Uydu Görüntüleri

Çalışma alanı için başlangıç ve bitişi 38 yıllık bir süreyi temsil eden 1984, 1990, 1996, 2002, 2008, 2015 ve 2022 olmak üzere yedi adet Collection 2 Level-2 Landsat uydu görüntüsü kullanılmıştır (Çizelge 1). Collection 2 Level-2 Landsat görüntüleri ücretsiz ve açık veri özeliğinde olup U.S. Geological Survey (USGS) Earth Explorer web sitesinden (USGS, 2023) indirilmiştir. Uydu görüntüleri bulut etkisi %15’ten az ve mevsimsel farklılıkları en aza indirmek için yaklaşık yakın aylarda olacak şekilde seçilmiştir. Görüntüler 30 m piksel boyutlu olup UTM projeksiyon sistemi ve WGS 84 datumundadır. Çalışmada kullanılan Collection 2 Level-2 görüntüleri analize hazır verilerdir. Radyometrik kalibrasyon ve atmosferik düzeltme işlemi USGS tarafından uygulanmıştır (USGS, 2022).

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan uydu görüntüleri.

Uydu	Sensör	Görüntü tarihi	Bulutluluk oranı
Landsat-5	TM	25.06.1984	% 0,00
Landsat-5	TM	25.05.1990	% 8,00
Landsat-5	TM	26.06.1996	% 5,00
Landsat-5	TM	29.07.2002	% 3,00
Landsat-5	TM	09.06.2008	% 4,00
Landsat-8	OLI	14.05.2015	% 3,59
Landsat-9	OLI-2	28.07.2022	% 10,83

3.2. Kıyı Çizgilerinin Belirlenmesi

Kara-su arayüzünün belirli bir andaki konumu olan kıyı çizgisi, kıyı erozyonu ve birikimlerin belirlenmesi için bir gösterge sağlayan oldukça dinamik bir özelliktir. Kıyı çizgisi basit tanımla ifade edilebilmesine karşın sürekli değişen dinamik özelliğinden dolayı belirlenmesi zordur (Esmail vd., 2019). Bir kıyı çizgisi üzerindeki her nokta, su yüzeyi seviyesinin tam olarak belirlenmesindeki zorluklardan ve diğer hata kaynaklarından dolayı bir dereceye kadar belirsizliğe sahiptir (Li vd., 2001). Buna karşın uydu görüntülerinden kolay ayırt edilebildiği için Yüksek Su Hattı (High Water Line-HWL) birçok araştırmada (Mahapatra vd., 2014; Nazeer vd., 2020; Roy vd., 2018) kara-su sınır çizgisinin temsil edilmesinde kullanılmıştır. Spektral su indeksleri işlem kolaylığı, hızlı ve etkin sonuç vermesi nedeniyle uydu görüntülerinden HWL'ye dayalı kıyı çizgilerinin çıkarımında yaygın olarak kullanılmaktadır (Awad ve El-Sayed, 2021; Wicaksono vd., 2019).

NDWI (Normalized Difference Water Index) indeksindeki yakın kızılötesi bant yerine orta kızılötesi bandın kullanılmasıyla oluşturulan MNDWI (Denklem 1) toprak ve yerleşim alanlarının suyla ayırımı geliştirdiği için özellikle toprak, kum ve yerleşim alanlarıyla sınır olan kıyı çizgilerinin çıkarımında doğruluğu artırmaktadır (Xu, 2006). Bu çalışmada incelenen alanda kum ve toprak alanları baskın olduğu için kıyı çizgilerinin çıkarımında MNDWI (Xu, 2006) kullanılmıştır. MNDWI indeks görüntülerinde bilinen pikseller yardımıyla belirlenen eşik değerler uygulanarak kara-su ayırımı yapılmıştır. Son aşamada kara ve su olmak üzere iki sınıflı raster görüntü verileri CBS ortamında vektör veriye dönüştürülerek çizgi veri tipinde kıyı çizgileri elde edilmiştir.

$$MNDWI = (Green - MIR)/(Green + MIR) \quad (1)$$

Denklem 1'de; Green yeşil bant ve MIR orta kızılötesi banttaki yansıtım değeridir.

3.3. Kıyı Çizgisi Değişim Oranlarının Belirlenmesi ve Sınıflandırılması

Kıyı çizgisi değişim oranları bir referans çizgisi oluşturulup bu referans çizgisi üzerinde belirli aralıklara göre dik olarak çizilen ve tüm kıyı çizgilerini kesen transektler kullanılarak hesaplanır. Transektlerin aralığının kısa olması, değişim oranının belirlenmesinde daha fazla ayrıntı vererek belirsizliği azaltabilir ancak daha fazla zaman alan bir işlemdir (Dey ve Jena, 2021). Bu çalışmada kullanılan uydu görüntüsünün çözünürlüğü de dikkate alınarak 50 m aralıklarla transektler oluşturulmuştur.

Her transekt için kıyı çizgisi değişim oranları EPR ve LRR yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. EPR, iki farklı tarihteki kıyı çizgisi arasındaki uzaklığın geçen süreye bölünmesiyle hesaplanır (Denklem 2) (Song vd., 2021). EPR'nin başlıca avantajları, hesaplama kolaylığı ve yalnızca iki farklı tarihe ait kıyı çizgisinin hesaplama için minimum gereksinimi karşılamasıdır. En büyük dezavantajı ise, daha fazla verinin mevcut olduğu durumlarda ek bilgilerin göz ardı edilmesidir (Esmail vd., 2019).

$$EPR = \frac{(L_2 - L_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

Denklem 2'de; L_1 ve L_2 sırasıyla eski ve yeni kıyı çizgisinin referans çizgisine olan uzaklıkları, t_1 ve t_2 ise sırasıyla eski ve yeni tarihtir (Song vd., 2021). Kıyı çizgisi değişim oranı

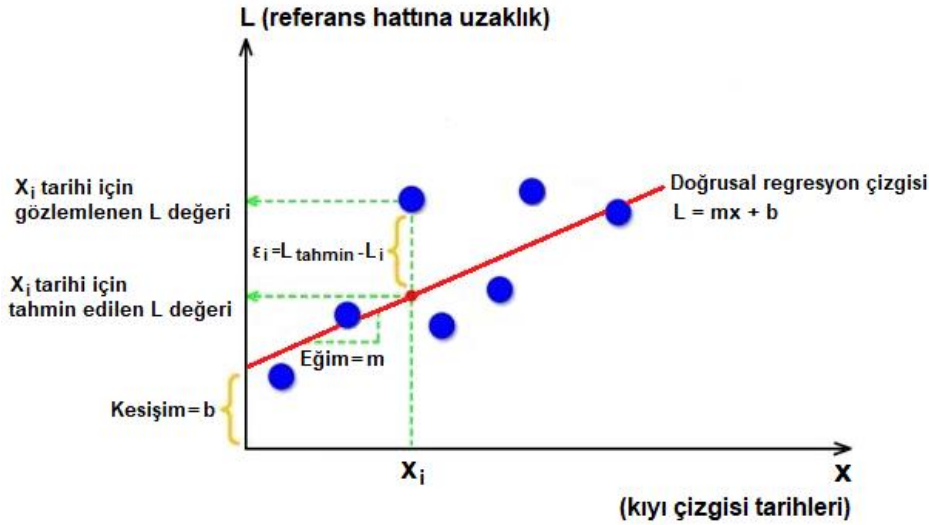
eğer referans çizgisi su tarafında ise “-EPR”, kara tarafında ise “EPR” değerine eşittir. Bu çalışma yıl bazlı gerçekleştirildiği için tarih olarak verilerin yıl değerleri kullanılmıştır.

LRR yönteminde ise değişim oranı, belirli bir transekt için tüm kıyı çizgisi noktalarına bir en küçük kareler regresyon çizgisi (Şekil 3) uydurarak belirlenebilir (Denklem 3) (Baig vd., 2020; Dey ve Jena, 2021; Esmail vd., 2019; Song vd., 2021).

LRR yönteminde incelenen periyotta mevcut olan ve istenilen tüm tarihlerdeki kıyı çizgileri analize dâhil edilerek daha gerçekçi bir yaklaşım sağlanır (Li vd., 2001). Yöntemin kabul görmüş istatistiksel kavramlara dayalı olması, uygulama kolaylığı, incelenen zaman periyodundaki tüm zaman serisi verilerinin kullanılabilme olanağı ile rastgele hataların ve kısa vadeli (geçici) değişimlerin analiz sonucuna olan etkisinin azaltılması en önemli avantajlarıdır (Dolan vd., 1991; Ozturk vd., 2015).

$$L = mx + b \quad (3)$$

Denklem 3’te; L kıyı çizgisinin mekânsal konumunu (bir transektin referans çizgisinden itibaren kıyı çizgisini kestiği noktaya kadar olan uzaklık) ifade eden bağımlı bir değişken, x tarihi ifade eden bağımsız bir değişken, b kesişim noktası, m ise birim başı x değişimine karşılık gelen L değişimini (doğrusal regresyon oranı olarak belirlenen kıyı çizgisi değişim oranı) ifade eden eğimdir (Baig vd., 2020; Das vd., 2021; Elfadaly vd., 2022). Kıyı çizgisi değişim oranı eğer referans çizgisi su tarafında ise “-m”, kara tarafında ise “m” değerine eşittir.



Şekil 3. Doğrusal regresyon.

Kıyı çizgisi değişim oranları belirli aralıklara göre sınıflandırılarak erozyon ve birikim dereceleri yönünden ifade edilebilmektedir. Çalışmada EPR ve LRR yöntemleri kullanılarak hesaplanan kıyı çizgisi değişim oranları Chenthamil Selvan vd. (2016) ve Baral vd. (2018)’de kullanılan sınıflandırma (Çizelge 2) takip edilerek kategorilendirilmiştir.

Çizelge 2. Kıyı çizgisi değişimi sınıflandırması.

Kıyı çizgisi değişim oranı (m/yıl)	Sınıflandırma
< -5	Yüksek erozyon
-3,01 – (-5,00)	Orta erozyon
-0,51 – (-3,00)	Düşük erozyon
-0,50 – (-0,50)	Stabil
+0,51 – (+3,00)	Düşük birikim
+3,01 – (+5,00)	Orta birikim
> 5,00	Yüksek birikim

3.4. Kıyı Çizgisinin Gelecekteki Konumunun Tahmini

Kıyı çizgisinin gelecek bir tarihteki konumu Denklem 4'te belirtilen şekilde kıyı çizgisi değişim oranı (eğim), gözlemlenen ve tahmin edilen kıyı çizgisi arasındaki zaman aralığı ve model kesişim değeri kullanılarak tahmin edilir (Aladwani, 2022; Li vd., 2001). Bir çalışma alanındaki kıyı çizgisinin gelecekteki zamansal değişimlerini tahmin etmek için yaygın olarak transektler için elde edilen kıyı çizgisi değişim oranları kullanılmaktadır (Aladwani, 2022; Awad ve El-Sayed, 2021; Deepika vd., 2014; Kumar vd., 2010; Nandi vd., 2016).

$$\text{Gelecekteki kıyı çizgisi konumu} = \text{Değişim oranı} \times \text{Zaman aralığı} + \text{Kesişim} \quad (4)$$

Denklem 4'e göre her transekt için son tarihteki kıyı çizgisi konumuna aradan geçen sürede oluşabilecek değişim eklenerek tahmin zamanı için kıyı çizgisi konumu belirlenebilir.

LRR yöntemiyle elde edilen kıyı çizgisi değişim oranlarının gelecek bir tarih için ekstrapolasyonu yapılarak tahminde kullanılmasının ne derece belirsizlik taşıyabileceğinin değerlendirilmesinde (doğrusal regresyon modelinin tahmin doğruluğu) belirleme katsayısı (R^2) hesaplanır (Denklem 5) (Barrett, 1974; Nandi vd., 2016). R^2 , doğrusal regresyon modelinin uyum iyiliği hakkında bilgi sağlar ve bir belirsizlik ölçütü görevi görür (Kumar vd., 2010; Maiti ve Bhattacharya, 2009). R^2 , 1,0 ila 0,0 arasında değişir; 1,0'a yakın değerler, regresyon çizgisinin bağımlı değişkendeki değişimin önemli bir bölümünü açıkladığını gösterirken, 0,0'a yakın değerler, çizginin bağımlı değişkendeki değişimin yalnızca küçük bir bölümünü açıkladığını ifade eder (Himmelstoss vd., 2018).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_{\text{ölçülen}} - y_{\text{tahmin}})^2}{\sum (y_{\text{ölçülen}} - y_{\text{ortalama}})^2} \quad (5)$$

Denklem 5'te; $y_{\text{ölçülen}}$ bir kıyı çizgisi veri noktasının referans çizgisine olan uzaklığı, y_{tahmin} regresyon denklemine dayalı olarak tahmin edilen konumun referans çizgisine olan uzaklığı ve y_{ortalama} referans çizgisinden ölçülen kıyı çizgisi uzaklıklarının ortalamasıdır.

EPR yöntemiyle genel periyodun yanı sıra farklı ara periyotlar için de kıyı çizgisi değişim oranları hesaplandığından hangi periyottaki değişim oranlarına göre ekstrapolasyon yapılmasının daha gerçekçi olacağı belirlenmesinde Pearson korelasyon analizi kullanılmıştır. Pearson korelasyon

katsayısı (r), iki değişken arasındaki doğrusal ilişkinin derecesini gösteren istatistiksel bir ölçüttür (Profillidis ve Botzoris, 2019; Xu, 2020). Korelasyon değeri $-1,0$ ila $+1,0$ arasında değişir. (-) değerler negatif doğrusal ilişkiyi, (+) değerler ise pozitif doğrusal ilişkiyi gösterir. 0 değeri iki veri arasında doğrusal bir ilişki bulunmadığını ifade ederken, 0'dan 1'e doğru değer artması doğrusal ilişki düzeyinin artması şeklinde yorumlanır (Christmann ve Badgett, 2009).

$$r = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (6)$$

Denklem 6'da; $cov(X, Y)$ X ve Y arasındaki kovaryans, σ_X X'in standart sapması ve σ_Y Y'nin standart sapmasıdır.

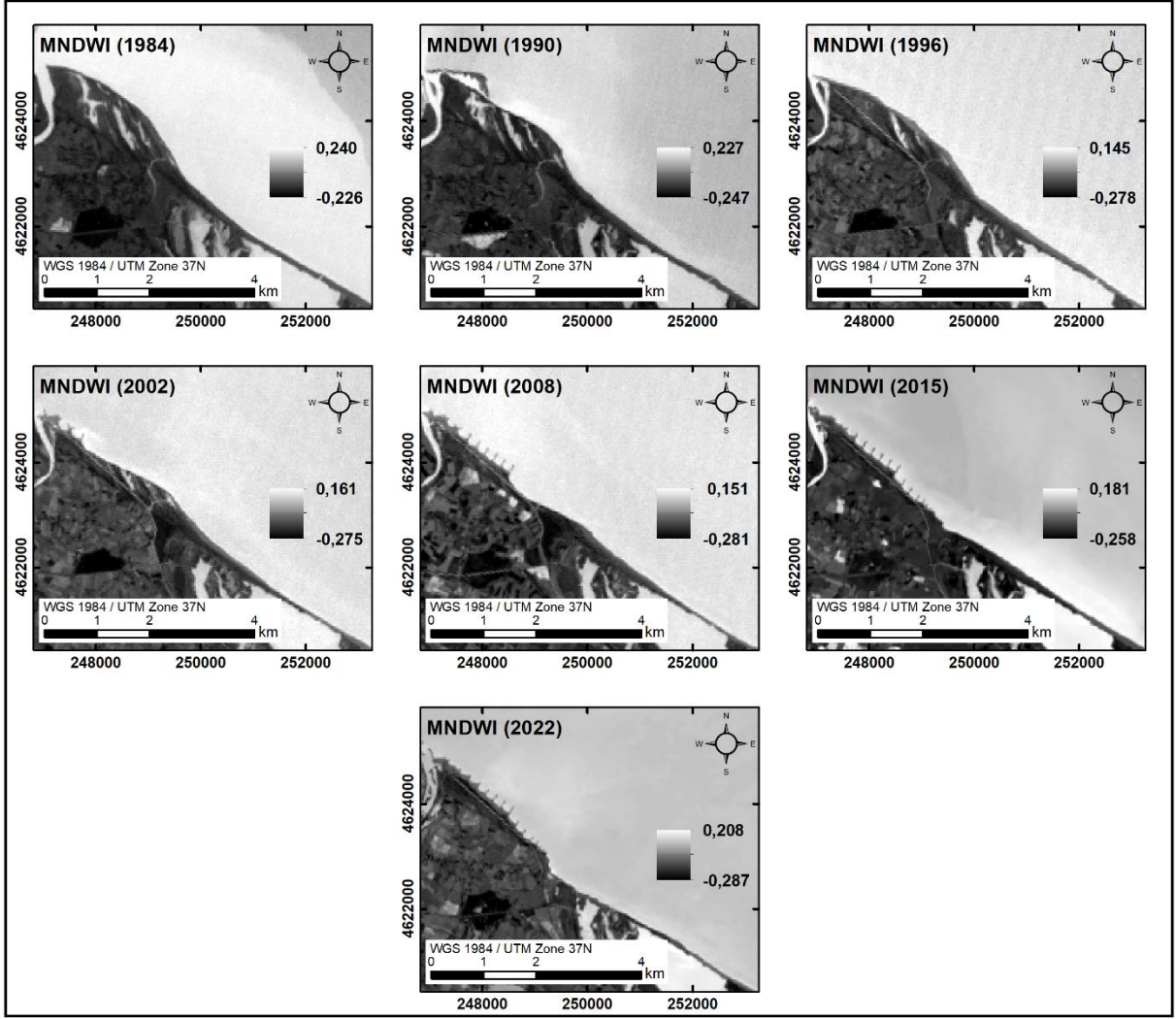
Kıyı süreçlerinin dinamik doğası nedeniyle, gelecekteki kıyı çizgisinin tahmini zor bir işlemdir (Islam ve Crawford, 2022). Çalışma alanının çok fazla antropojenik etkiye maruz kalması nedeniyle bu çalışmada 2022 yılından itibaren 8 yıllık bir periyotta 2030 yılı için tahmin yapılmıştır. 2030 yılı kıyı çizgisi konumunun EPR ile tahmini için farklı periyotlardaki kıyı çizgisi değişim oranları arasındaki korelasyonlar araştırılarak 2022–2030 periyodundaki değişimleri en iyi karakterize edebilecek periyot belirlenmiştir.

4. Bulgular

Kızılırmak Deltasında 1984, 1990, 1996, 2002, 2008, 2015 ve 2022 yıllarına ait kıyı çizgilerinden yararlanılarak kıyı çizgisi değişim oranları (m/yıl) ve alan değişimleri (ha) belirlenmiş, 2030 yılı için kıyı çizgisinin konumunun tahmini yapılmıştır. Kıyı çizgisi değişim oranlarının yorumlanmasında negatif (-) değerler erozyonu (kara yönünde gerileme), pozitif (+) değerler ise birikimi (deniz yönünde ilerleme) göstermektedir.

4.1. Uydu Görüntülerinden Kıyı Çizgilerinin Belirlenmesi

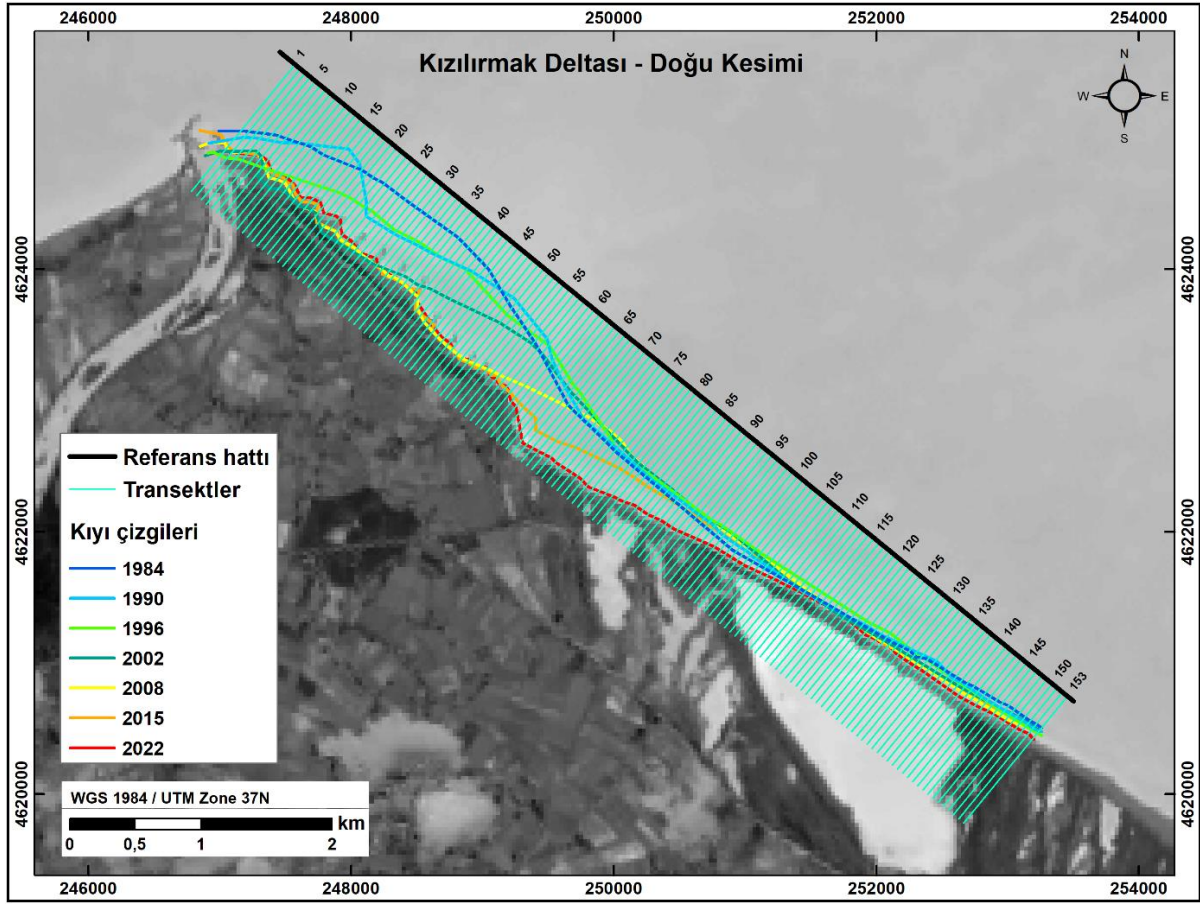
Kızılırmak Deltası kıyı çizgileri 1984, 1990, 1996, 2002, 2008, 2015 ve 2022 yıllarına ait Landsat-5 TM/Landsat-8 OLI/Landsat-9 OLI-2 görüntüleri kullanılarak belirlenmiştir. Görüntülerde MNDWI indeksi uygulanmış (Şekil 4) ve bilinen pikseller yardımıyla eşik değerler (Çizelge 3) belirlenerek kara ve su olmak üzere iki sınıflı görüntüler oluşturulmuştur. İki sınıflı görüntüler vektör veriye dönüştürülerek kıyı çizgileri elde edilmiştir (Şekil 5).



Şekil 4. MNDWI indeks görüntüleri.

Çizelge 3. MNDWI indeks görüntülerinde kara-su ayrımı için eşik değerler.

Görüntü	Eşik değeri
25.06.1984 Landsat-5 TM	0,057
25.05.1990 Landsat-5 TM	0,062
26.06.1996 Landsat-5 TM	0,030
29.07.2002 Landsat-5 TM	0,023
09.06.2008 Landsat-5 TM	0,059
14.05.2015 Landsat-8 OLI	0,013
28.07.2022 Landsat-9 OLI-2	0,039



Şekil 5. Kıyı çizgileri ve transektler.

4.2. Kıyı Çizgisi Değişim Analizi

Kıyı çizgisi değişimlerinin analizinde 153 adet transekt kullanılmış (Şekil 5), her transekte kıyı çizgisi değişim oranları (yıllık hareket miktarı (m/yıl) ve yönleri) elde edilmiştir. Farklı kısa periyotlu (1984–1990, 1990–1996, 1996–2002, 2002–2008, 2008–2015 ve 2015–2022) değişim aralıkları EPR ile analiz edilerek çalışma alanındaki kıyı erozyonunun farklı zaman aralıklarında hızlanma/yavaşlama durumları tespit edilmiştir. 1984’ten 2022’ye kadar gerçekleşen genel değişim ise hem EPR hem de LRR yöntemi ile belirlenmiştir. Çizelge 4, 5 ve 6’da TNo transekt numarasını, P1 1984–1990, P2 1990–1996, P3 1996–2002, P4 2002–2008, P5 2008–2015, P6 2015–2022 kısa periyotlarını ve Pg 1984–2022 genel periyodunu ifade etmektedir.

Çizelge 4’te 153 transekt için EPR ve LRR yöntemleriyle belirlenen kıyı çizgisi değişim oranları yer almaktadır. Çizelge 4 incelendiğinde, maksimum erozyon 1984–1990 periyodunda -47,0 m/yıl ile 24 nolu transekte, 1990–1996 periyodunda -60,0 m/yıl ile 15 nolu transekte, 1996–2002 periyodunda -57,3 m/yıl ile 24 nolu transekte, 2002–2008 periyodunda -63,0 m/yıl ile 50 nolu transekte, 2008–2015 periyodunda -39,8 m/yıl ile 68 nolu transekte ve 2015–2022 periyodunda -33,8 m/yıl ile 77 nolu transekte gerçekleşmiştir. 1984–2022 genel periyodu için ise maksimum erozyon

EPR yöntemine göre -16,2 m/yıl ile 43 nolu transekte, LRR yöntemine göre -19,6 m/yıl ile 44 nolu transekte gelişmiştir.

Çizelge 4. Farklı periyotlar için kıyı çizgisi değişim oranları.

TN	EPR							LRR	TN	EPR							LRR
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Pg	Pg		P1	P2	P3	P4	P5	P6	Pg	Pg
1	-13,1	-27,7	7,5	5,2	2,1	-6,8	-5,3	-3,8	38	-29,2	-0,6	-43,6	-16,7	-1,2	-0,5	-14,5	-15,5
2	-9,1	-34,1	10,5	-0,6	1,5	-1,9	-5,3	-4,5	39	-26,0	-0,7	-43,1	-30,6	-2,5	6,3	-15,1	-17,4
3	-8,5	-34,5	12,4	-1,1	-0,4	-1,3	-5,3	-4,6	40	-22,9	-0,8	-43,5	-36,1	1,0	3,8	-15,4	-17,9
4	-8,6	-35,4	15,6	0,3	-3,5	-1,1	-5,3	-4,4	41	-19,7	-1,8	-42,9	-41,3	4,2	1,2	-15,7	-18,4
5	-9,2	-37,1	17,3	-0,4	-2,7	-0,8	-5,3	-4,4	42	-16,9	-4,8	-40,0	-44,7	5,5	-0,9	-15,9	-18,7
6	-8,7	-38,7	11,2	0,8	-0,6	2,0	-5,4	-4,8	43	-15,0	-6,9	-36,7	-48,1	0,8	2,8	-16,2	-19,4
7	-7,2	-40,3	-2,9	8,2	0,8	3,9	-5,8	-5,7	44	-12,1	-9,1	-33,5	-51,0	-0,5	3,7	-16,1	-19,6
8	-3,3	-44,3	-15,7	12,2	3,9	1,7	-7,0	-7,4	45	-8,1	-11,2	-30,2	-53,7	-0,3	3,5	-15,7	-19,4
9	-0,3	-47,1	-20,2	9,2	6,3	2,5	-7,6	-8,5	46	-4,1	-13,4	-27,0	-57,0	1,3	3,1	-15,2	-19,1
10	1,7	-49,2	-24,6	15,0	4,5	2,2	-7,8	-8,8	47	0,0	-15,5	-23,8	-58,8	1,4	0,4	-15,2	-19,1
11	4,4	-51,4	-20,6	10,8	2,7	2,8	-7,9	-9,2	48	4,0	-17,7	-20,5	-60,7	-0,8	-1,2	-15,4	-19,4
12	9,0	-53,7	-21,0	6,0	5,1	2,0	-8,1	-9,8	49	8,1	-19,8	-17,3	-62,6	-2,9	2,1	-14,6	-19,1
13	13,5	-56,0	-24,8	3,3	5,2	3,4	-8,5	-10,9	50	10,2	-20,2	-14,2	-63,0	-1,8	3,0	-13,6	-18,1
14	16,2	-58,0	-29,3	0,5	5,6	2,9	-9,6	-12,4	51	11,0	-18,6	-13,2	-61,5	-2,7	1,1	-13,3	-17,6
15	18,8	-60,0	-33,8	-0,2	5,9	5,5	-9,8	-13,1	52	11,8	-16,5	-12,7	-59,9	-2,6	1,9	-12,3	-16,7
16	17,4	-57,9	-33,4	-0,7	7,5	5,3	-9,4	-12,7	53	12,8	-14,4	-12,2	-58,4	-0,8	1,2	-11,3	-15,5
17	12,4	-52,3	-34,5	0,3	8,3	3,8	-9,5	-12,2	54	13,7	-12,3	-11,7	-57,0	-3,8	-1,7	-11,6	-15,7
18	7,4	-46,6	-38,0	-0,4	-0,3	10,1	-10,4	-13,6	55	14,6	-10,2	-11,2	-56,3	-3,3	-2,0	-10,9	-14,9
19	-1,4	-37,8	-46,1	-0,3	-1,2	13,2	-11,3	-14,5	56	15,4	-8,1	-11,5	-54,1	-8,5	-1,9	-11,1	-15,1
20	-9,4	-28,6	-53,6	4,7	1,2	15,0	-10,7	-13,5	57	16,9	-5,9	-12,4	-51,1	-11,0	2,0	-10,0	-14,2
21	-17,3	-20,2	-56,9	9,5	0,9	14,1	-10,6	-12,7	58	15,0	-0,1	-13,7	-47,8	-13,8	-1,7	-10,2	-14,1
22	-26,1	-12,3	-56,5	9,8	0,0	8,2	-11,9	-13,1	59	12,1	3,9	-13,2	-43,4	-17,0	-5,8	-10,6	-13,8
23	-35,6	-2,8	-56,6	6,2	-1,7	6,2	-13,2	-13,8	60	9,7	6,8	-12,3	-39,3	-19,7	-5,6	-10,2	-13,1
24	-47,0	10,0	-57,3	4,8	-2,3	7,7	-13,1	-13,1	61	9,2	8,0	-11,4	-35,7	-21,9	-10,7	-10,7	-13,1
25	-46,2	8,7	-56,0	5,2	-2,1	5,9	-13,2	-13,1	62	8,6	9,2	-10,6	-31,4	-24,2	-16,2	-11,3	-13,1
26	-45,4	7,5	-54,7	4,6	-0,1	1,0	-13,7	-13,3	63	8,0	10,4	-9,9	-27,6	-26,1	-21,8	-11,8	-13,1
27	-44,6	6,3	-53,4	3,1	-1,6	2,5	-13,8	-13,6	64	7,7	11,3	-9,1	-23,5	-32,6	-23,0	-12,4	-13,5
28	-43,8	5,0	-52,2	2,0	-0,9	4,4	-13,4	-13,3	65	8,1	11,5	-8,3	-19,5	-39,4	-19,1	-12,1	-13,3
29	-43,2	4,8	-51,9	1,0	0,0	5,8	-13,0	-13,1	66	8,4	13,8	-8,6	-16,7	-39,3	-19,2	-11,3	-12,4
30	-42,3	5,3	-51,8	0,2	-0,8	2,5	-13,7	-13,6	67	6,4	14,2	-7,1	-13,8	-39,3	-19,3	-10,8	-11,6
31	-40,7	4,8	-50,8	-1,8	-1,0	0,5	-14,0	-14,0	68	4,0	14,7	-5,5	-10,5	-39,8	-19,3	-10,5	-10,9
32	-39,1	4,7	-50,1	-5,8	-2,0	3,1	-14,1	-14,4	69	1,5	15,1	-4,0	-7,1	-39,1	-19,9	-10,0	-10,0
33	-37,6	4,2	-49,0	-6,4	-1,6	1,3	-14,1	-14,4	70	1,3	13,6	-2,7	-4,6	-37,5	-23,4	-10,0	-9,6
34	-36,6	3,3	-47,0	-7,6	-0,7	-0,4	-14,1	-14,3	71	1,6	11,5	-1,5	-2,4	-35,5	-25,8	-9,8	-9,1
35	-35,5	2,4	-46,0	-9,3	0,2	-0,9	-14,1	-14,4	72	1,9	9,4	-0,2	-0,3	-34,5	-26,8	-9,6	-8,6
36	-34,2	1,2	-46,0	-10,3	1,5	-1,5	-14,1	-14,5	73	2,2	7,3	1,1	1,9	-33,6	-27,7	-9,3	-8,2
37	-32,4	-0,3	-45,1	-12,2	4,5	-3,8	-14,1	-14,4	74	2,6	5,0	2,7	3,2	-32,0	-28,6	-9,0	-7,8

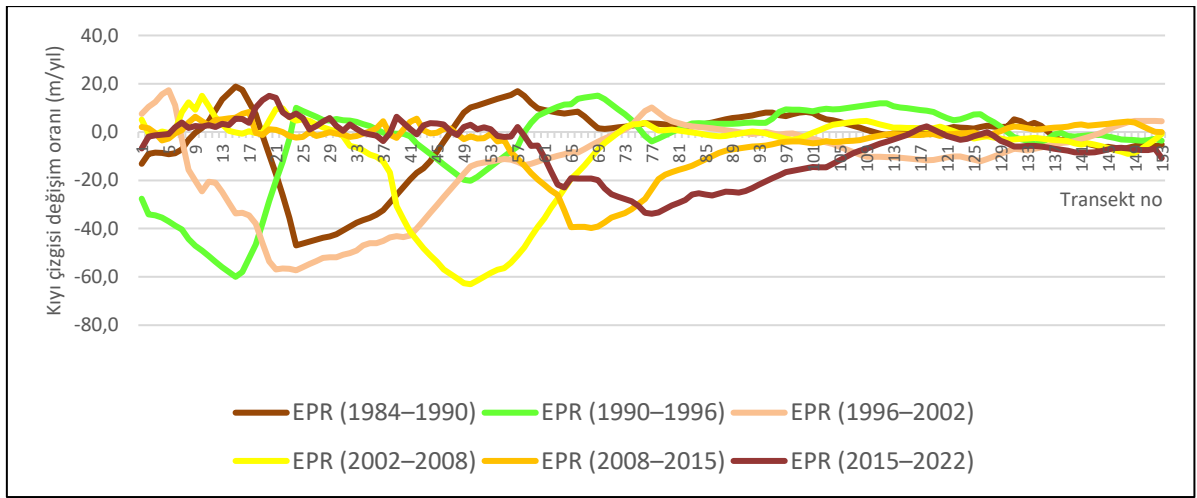
Çizelge 4. Farklı periyotlar için kıyı çizgisi değişim oranları (Devam).

TN	EPR							LRR	TN	EPR							LRR
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Pg	Pg		P1	P2	P3	P4	P5	P6	Pg	Pg
75	3,0	1,8	5,7	3,3	-29,9	-30,6	-8,9	-7,4	115	-0,6	9,9	-10,9	1,7	-1,1	-1,2	-0,4	-0,6
76	3,7	-1,6	8,7	3,8	-27,8	-33,5	-9,0	-7,2	116	-0,6	9,5	-11,1	1,7	-1,2	0,1	-0,3	-0,6
77	3,6	-3,9	10,1	2,2	-23,7	-33,8	-8,7	-6,8	117	-0,6	9,2	-11,4	1,6	-1,3	1,5	-0,1	-0,6
78	3,3	-2,6	8,0	0,6	-19,5	-33,3	-8,3	-6,4	118	-0,6	8,8	-11,7	1,5	-1,0	2,3	-0,1	-0,5
79	3,1	-1,4	6,0	0,7	-17,7	-31,9	-7,8	-6,1	119	-0,4	8,3	-11,5	1,5	-0,8	1,0	-0,3	-0,7
80	2,9	-0,1	4,4	1,1	-16,6	-30,4	-7,3	-5,7	120	0,5	7,0	-11,0	2,2	-1,6	-0,4	-0,6	-0,9
81	2,7	1,2	3,6	0,6	-15,6	-29,4	-7,0	-5,5	121	1,4	5,8	-10,5	1,3	-1,0	-1,6	-0,8	-1,2
82	2,5	2,5	2,9	0,2	-14,8	-28,1	-6,6	-5,2	122	2,0	4,8	-10,1	0,3	-0,8	-2,4	-1,1	-1,4
83	2,3	3,6	2,3	-0,2	-14,0	-25,9	-6,1	-4,8	123	1,8	5,2	-10,1	-0,7	-0,6	-3,3	-1,3	-1,6
84	2,8	3,6	2,0	-0,6	-12,7	-25,3	-5,8	-4,5	124	1,6	6,2	-10,8	-1,7	-0,4	-2,8	-1,3	-1,7
85	3,4	3,5	1,8	-1,1	-11,3	-25,9	-5,6	-4,4	125	1,4	7,2	-11,4	-2,6	-0,2	-1,7	-1,2	-1,7
86	4,0	3,5	1,5	-1,5	-10,0	-26,3	-5,5	-4,3	126	2,0	7,4	-12,1	-2,1	-1,2	-0,9	-1,2	-1,8
87	4,6	3,4	1,2	-1,8	-8,6	-25,5	-5,1	-4,0	127	2,6	5,6	-11,2	-1,8	-1,4	-0,1	-1,0	-1,7
88	5,2	3,3	0,8	-1,6	-7,8	-24,8	-4,8	-3,7	128	2,2	4,0	-10,1	-2,3	-0,5	-1,7	-1,4	-1,9
89	5,7	3,4	0,4	-1,1	-7,2	-24,8	-4,6	-3,6	129	2,1	2,2	-9,0	-2,7	0,4	-3,6	-1,8	-2,2
90	6,1	3,6	0,0	-0,6	-6,8	-25,1	-4,5	-3,4	130	2,3	0,0	-8,0	-3,2	1,5	-4,7	-2,0	-2,3
91	6,4	3,8	-0,4	-0,2	-6,5	-24,5	-4,2	-3,2	131	5,2	-2,1	-6,9	-3,1	2,3	-5,9	-1,8	-2,1
92	6,9	3,9	-0,8	0,3	-6,1	-23,2	-3,8	-2,9	132	4,5	-2,9	-7,2	-2,9	2,1	-6,0	-2,1	-2,4
93	7,5	3,8	-0,4	-0,1	-5,9	-21,8	-3,4	-2,6	133	2,7	-3,6	-7,6	-2,6	1,5	-5,8	-2,5	-2,8
94	8,1	3,7	0,1	-0,6	-5,6	-20,4	-3,0	-2,3	134	3,8	-5,3	-7,0	-2,4	1,0	-5,7	-2,6	-2,9
95	8,1	5,5	-0,6	-1,3	-5,0	-19,2	-2,6	-2,1	135	2,6	-4,6	-6,4	-2,7	1,1	-6,0	-2,7	-2,9
96	6,9	8,3	-1,1	-2,1	-4,4	-17,9	-2,2	-1,7	136	0,2	-2,8	-5,8	-3,1	1,5	-6,5	-2,7	-2,7
97	6,6	9,3	-0,7	-2,8	-4,1	-16,6	-1,8	-1,4	137	-2,2	-1,0	-5,2	-3,4	1,8	-6,9	-2,8	-2,6
98	7,3	9,3	-0,6	-3,3	-3,8	-16,1	-1,7	-1,3	138	-3,4	-0,3	-4,6	-3,5	1,9	-7,3	-2,9	-2,5
99	8,1	9,2	-1,3	-2,6	-3,8	-15,5	-1,5	-1,2	139	-2,3	-1,7	-4,3	-3,7	2,2	-7,8	-2,9	-2,7
100	8,3	9,0	-2,1	-1,5	-4,3	-15,0	-1,4	-1,1	140	-2,7	-1,9	-3,7	-4,6	2,9	-8,4	-3,1	-2,7
101	7,9	8,6	-2,8	-0,4	-4,7	-14,5	-1,4	-1,2	141	-4,2	-1,6	-2,9	-5,2	3,2	-8,6	-3,2	-2,8
102	6,4	9,3	-3,5	0,8	-4,4	-14,7	-1,5	-1,1	142	-4,9	-1,3	-2,2	-4,7	2,6	-8,5	-3,2	-2,6
103	5,2	9,7	-4,2	1,9	-3,8	-14,6	-1,4	-0,9	143	-5,6	-1,3	-1,2	-5,3	2,8	-8,4	-3,1	-2,5
104	4,8	9,3	-5,0	3,0	-4,2	-13,1	-1,3	-0,8	144	-6,2	-1,2	-0,3	-5,8	3,2	-7,9	-3,0	-2,4
105	4,3	9,5	-6,1	3,4	-4,0	-11,7	-1,1	-0,8	145	-6,2	-1,8	1,0	-6,7	3,5	-7,3	-2,9	-2,3
106	3,5	9,9	-7,2	3,8	-3,8	-10,3	-1,0	-0,7	146	-6,5	-2,5	2,2	-7,5	3,8	-6,6	-2,8	-2,2
107	2,7	10,3	-8,3	4,1	-3,6	-8,8	-0,9	-0,7	147	-7,4	-3,0	3,2	-8,1	4,1	-6,5	-2,9	-2,2
108	1,8	10,7	-9,4	4,5	-3,3	-7,7	-0,8	-0,6	148	-6,6	-3,2	4,1	-9,1	4,4	-6,8	-2,8	-2,2
109	1,0	11,1	-10,3	4,6	-2,7	-7,0	-0,8	-0,6	149	-5,8	-3,4	4,6	-8,7	3,9	-7,1	-2,7	-2,1
110	0,1	11,4	-10,3	3,9	-2,1	-5,9	-0,7	-0,5	150	-5,1	-3,6	4,6	-6,9	2,6	-7,4	-2,6	-2,0
111	-0,8	11,8	-10,3	3,2	-1,5	-4,9	-0,5	-0,4	151	-5,1	-3,3	4,6	-5,1	1,4	-7,4	-2,5	-1,8
112	-1,3	11,9	-10,3	2,5	-1,0	-4,0	-0,5	-0,4	152	-5,8	-2,8	4,6	-3,1	0,1	-7,0	-2,4	-1,6
113	-0,5	10,7	-10,3	1,9	-0,8	-3,1	-0,5	-0,5	153	-5,2	-3,6	4,4	-0,9	0,0	-10,7	-2,8	-1,7
114	-0,6	10,2	-10,6	1,8	-0,9	-2,2	-0,4	-0,6									

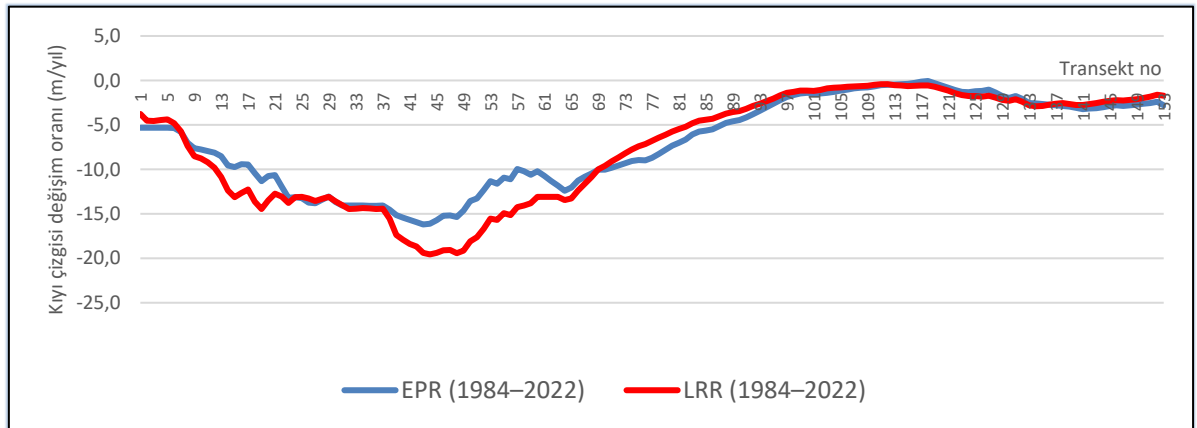
Her bir transektteki kıyı çizgisi değişiminin farklı periyotlar için davranışının izlenmesi amacıyla Çizelge 4'te yer alan EPR kıyı çizgisi değişim oranları grafiksel olarak gösterilmiştir (Şekil 6). Şekil 6 incelendiğinde (sayısal değerler Çizelge 4'ten takip edilebilir) periyotlar ilerledikçe erozyonun kıyı boyunca doğu yönünde ilerlediği, 2008–2015 ve 2015–2022 periyotlarında

mahmuzların bulunduğu bölgede (59 nolu transekte kadar olan kısım) erozyonun azaldığı ve kıyının daha istikrarlı hale geldiği görülmektedir.

1984–2022 genel değerlendirme periyodunda EPR ve LRR sonuçları karşılaştırıldığında (Şekil 7) sonuçların benzer olduğu görülmektedir. EPR ve LRR arasındaki Pearson korelasyon katsayısı değeri 0,97 olarak hesaplanmıştır. Bu durum 1984–2022 periyodunda gerçekleşen toplam değişimin (sadece 1984 ve 2022 yılı dikkate alınarak) ara yıllardaki tüm değişimler dikkate alındığında gerçekleşen genel değişim eğilimiyle uyumlu olduğunu göstermektedir. Buna karşın 11–22 (Y şeklindeki 2 nolu mahmuz ve 5 nolu düz mahmuz arasındaki kısım) ve 38–66 nolu transekt bölümlerinde (8–15 nolu düz mahmuzların arası ve 15 nolu mahmuzdan itibaren yaklaşık 400 m uzunluğundaki kıyı) EPR ve LRR arasındaki farklar 1 m/yıl'dan daha fazladır.



Şekil 6. Farklı periyotlar için EPR sonuçlarının karşılaştırılması.



Şekil 7. 1984–2022 periyodunda EPR ve LRR sonuçlarının karşılaştırılması.

Tüm periyotlarda transektlerin bütüncül değerlendirmesi için hesaplanan kıyı çizgisi değişim oranlarının tanımlayıcı istatistik bilgileri Çizelge 5'te gösterilmiştir. 1984–1990 periyodunda 64 transekte ortalama -15,2 m/yıl, 1990–1996 periyodunda 73 transekte ortalama -16,5 m/yıl, 1996–

2002 periyodunda 120 transekte ortalama -18,8 m/yıl, 2002–2008 periyodunda 98 transekte ortalama -15,8 m/yıl, 2008–2015 periyodunda 103 transekte ortalama -9,1 m/yıl, 2015–2022 periyodunda 107 adet transekte ortalama -12,1 m/yıl erozyon gerçekleşmiştir. Tüm periyotlardaki maksimum erozyon oranlarının en yükseği 2002–2008 periyodunda -63,0 m/yıl değeri ile (50 nolu transekt) gerçekleşmiştir. Genel değişim oranları açısından 1984–2022 periyodu incelendiğinde ise hem EPR hem de LRR ile 153 transektin tamamında erozyon belirlenmiştir. Bu periyotta EPR yöntemine göre -7,0 m/yıl ortalama ve -16,2 m/yıl maksimum, LRR yöntemine göre -7,5 m/yıl ortalama ve -19,6 m/yıl maksimum erozyon gerçekleşmiştir.

Birikimler ele alındığında ise çalışma alanının düşük birikim değerleri ile karakterize olduğu görülmektedir. 1984–1990 periyodunda 89 transekte ortalama 6,0 m/yıl, 1990–1996 periyodunda 80 transekte ortalama 7,2 m/yıl, 1996–2002 periyodunda 33 transekte ortalama 5,2 m/yıl, 2002–2008 periyodunda 55 transekte ortalama 3,5 m/yıl, 2008–2015 periyodunda 50 transekte ortalama 2,7 m/yıl, 2015–2022 periyodunda 46 adet transekte ortalama 3,9 m/yıl birikim gerçekleşmiştir. Tüm periyotlardaki maksimum birikim oranlarının en yükseği 1984–1990 periyodunda 15 nolu transekte 18,8 m/yıl değeri ile gerçekleşmiştir. Genel değişim oranları açısından 1984–2022 periyodu incelendiğinde ise hem EPR hem de LRR ile hiçbir transekte birikim bulunmamaktadır.

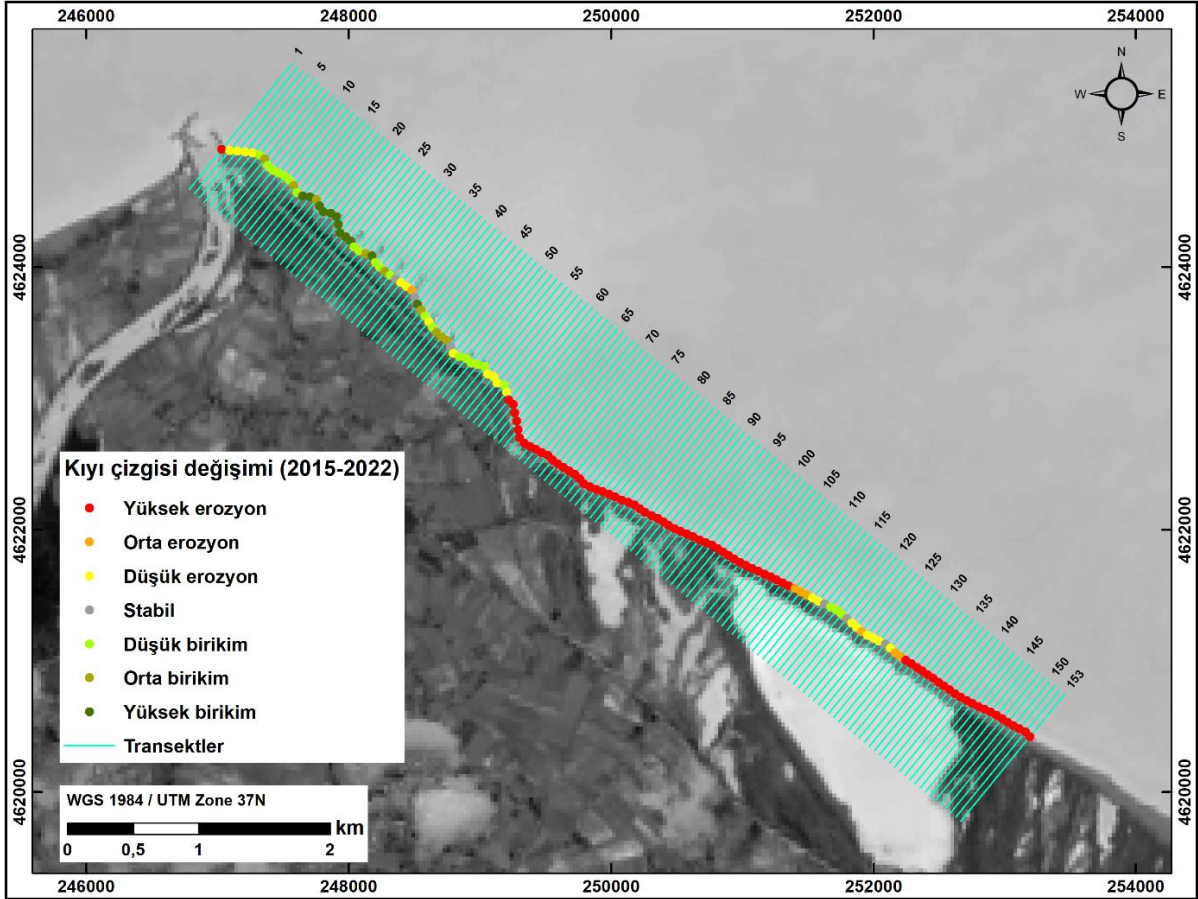
Çizelge 5. Kıyı çizgisi değişim oranı tanımlayıcı istatistik bilgileri.

	EPR							LRR
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Pg	Pg
Kıyı çizgisi değişim oranı <0 olan transekt sayısı	64	73	120	98	103	107	153	153
<0 olan transektler için ortalama (m/yıl)	-15,2	-16,5	-18,8	-15,8	-9,1	-12,1	-7,0	-7,5
<0 olan transektler için maksimum (m/yıl)	-47,0	-60,0	-57,3	-63,0	-39,8	-33,8	-16,2	-19,6
<0 olan transektler için minimum (m/yıl)	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,4
Kıyı çizgisi değişim oranı ≥0 olan transekt sayısı	89	80	33	55	50	46	-	-
≥0 olan transektler için ortalama (m/yıl)	6,0	7,2	5,2	3,5	2,7	3,9	-	-
≥0 olan transektler için maksimum (m/yıl)	18,8	15,1	17,3	15,0	8,3	15,0	-	-
≥0 olan transektler için minimum (m/yıl)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	-	-
Tüm transektler için genel ortalama değişim oranı (m/yıl)	-2,8	-4,1	-13,6	-8,9	-5,2	-7,3	-7,0	-7,5

EPR ve LRR yöntemleri ile belirlenen kıyı çizgisi değişim oranları Çizelge 2’de yer alan kıyı çizgisi değişim sınıfları ölçeği kullanılarak erozyon ve birikim derecelerine sınıflandırılmıştır (Çizelge 6). Çizelge 6’ya göre çalışma alanının 1984–1990 periyodunda % 29, 1990–1996 periyodunda % 25, 1996–2002 periyodunda % 61, 2002–2008 periyodunda % 31, 2008–2015 periyodunda % 26 ve 2015–2022 periyodunda ise % 49’luk kesiminde yüksek erozyon belirlenmiştir. 1984–2022 periyodundaki genel değerlendirme açısından ise EPR yöntemine göre % 57, LRR yöntemine göre % 50’inde yüksek erozyon gerçekleşmiştir. Çalışmadaki son inceleme dönemi olan 2015–2022 periyodu için EPR yöntemiyle belirlenen kıyı çizgisi değişim oranlarının sınıflandırması 2022 yılı MNDWI indeks görüntüsü üzerinde 2022 yılı kıyı çizgisine işlenerek gösterilmiştir (Şekil 8). 2015–2022 periyodunda yüksek erozyon belirlenen bölgenin tamamı mahmuzların bittiği noktanın doğusunda kalmakta olup 59–110 ve 132–153 nolu transektlere karşılık gelmektedir.

Çizelge 6. Yıllık kıyı çizgisi değişim oranlarının sınıflandırılması.

Sınıflandırma	Transekt sayısı (yüzdesi)							LRR
	EPR							
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Pg	
Yüksek erozyon	44 (% 29)	38 (% 25)	94 (% 61)	48 (% 31)	40 (% 26)	76 (% 49)	87 (% 57)	76 (% 50)
Orta erozyon	5 (% 3)	10 (% 6)	7 (% 5)	11 (% 7)	16 (% 11)	7 (% 5)	12 (% 8)	15 (% 10)
Düşük erozyon	12 (% 8)	21 (% 14)	14 (% 9)	30 (% 20)	40 (% 26)	20 (% 13)	46 (% 30)	60 (% 39)
Stabil	5 (% 3)	5 (% 3)	7 (% 5)	15 (% 10)	12 (% 8)	6 (% 4)	8 (% 5)	2 (% 1)
Düşük birikim	28 (% 18)	6 (% 4)	11 (% 7)	22 (% 14)	26 (% 17)	23 (% 15)	-	-
Orta birikim	16 (% 11)	21 (% 14)	9 (% 6)	16 (% 11)	11 (% 7)	9 (% 6)	-	-
Yüksek birikim	43 (% 28)	52 (% 34)	11 (% 7)	11 (% 7)	8 (% 5)	12 (% 8)	-	-



Şekil 8. 2015–2022 periyodunda EPR sonuçlarına göre kıyı çizgisi değişiminin sınıflandırması.

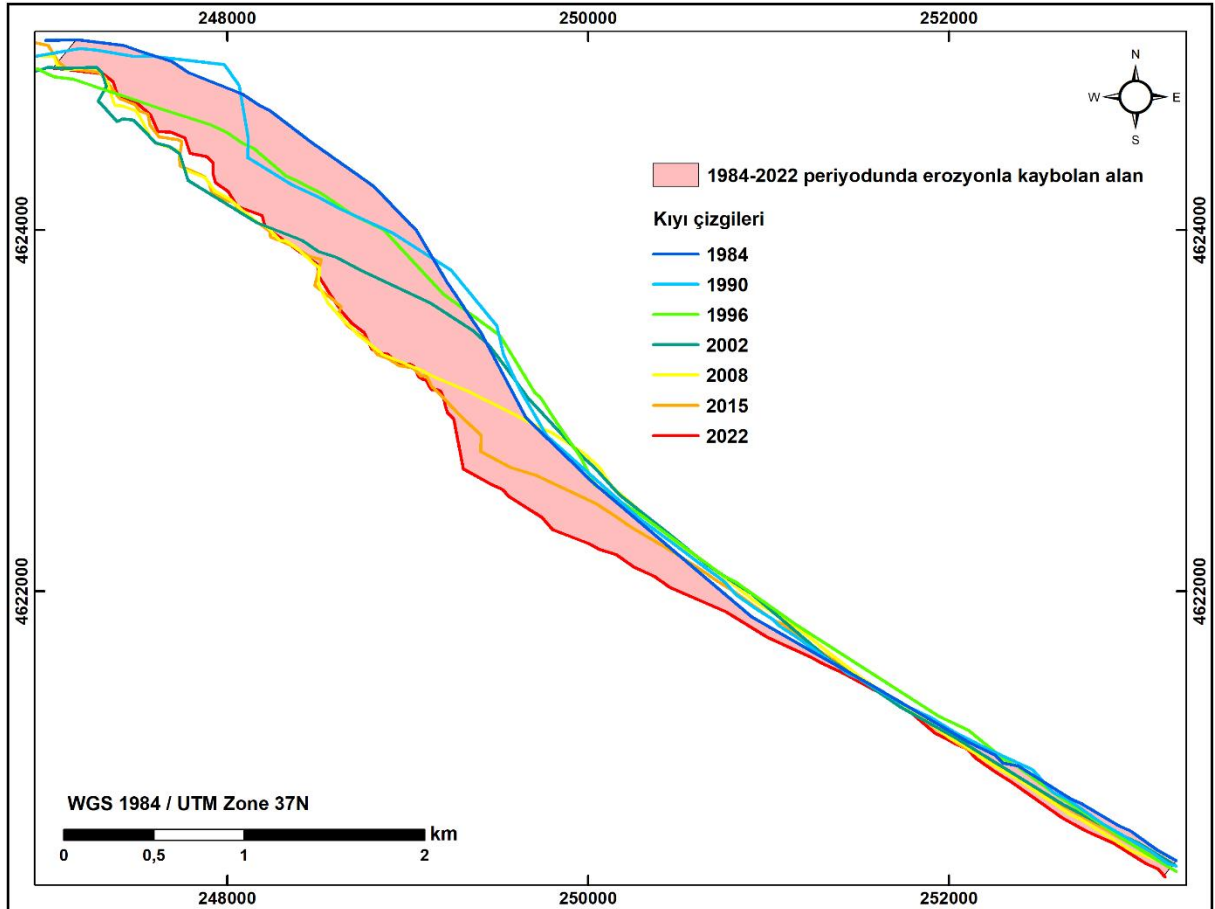
4.3. Erozyon ve Birikim Yüzey Alanları

Erozyon ile kaybedilen veya birikim ile kazanılan alanların yüzey alanlarının belirlenmesi amacıyla ArcGIS programında “simetrik fark” aracı kullanılarak çakıştırma analizi yapılmıştır.

Çizelge 7’de 1984–1990, 1990–1996, 1996–2002, 2002–2008, 2008–2015, 2015–2022 ve 1984–2022 periyotları için yıllık ve tüm periyot kapsamında toplam erozyon ve birikim alanları gösterilmektedir. Yıllık erozyon bazında en yüksek erozyon 11,27 ha ile 1996–2002, en yüksek birikim ise 2,89 ha ile 1990–1996 periyodunda gerçekleşmiştir. Tüm periyotlarda erozyon miktarı birikimden fazla olup 1984–2022 genel periyodu için birikim bulunmamaktadır. 1984–2022 periyodunda gerçekleşen değişim Şekil 9’da gösterilmektedir. Şekil 9 incelendiğinde 2022’ye kadar erozyonla kaybedilen alanlarının nehir ağzından doğu istikametine doğru azaldığı ancak kıyı çizgileri takip edildiğinde erozyonun giderek daha doğuya doğru taşındığı görülmektedir.

Çizelge 7. Erozyon ve birikim alanları.

Periyot	Yıllık			Tüm periyot		
	Erozyon (ha)	Birikim (ha)	Net kayıp (ha)	Erozyon (ha)	Birikim (ha)	Net kayıp (ha)
1984–1990	4,81	2,69	2,12	28,86	16,14	12,72
1990–1996	5,95	2,89	3,06	35,70	17,34	18,36
1996–2002	11,27	0,84	10,43	67,62	5,04	62,58
2002–2008	7,77	0,94	6,83	46,62	5,64	40,98
2008–2015	4,70	0,70	4,00	32,90	4,90	28,00
2015–2022	6,45	0,90	5,55	45,15	6,30	38,85
1984–2022	5,30	0,00	5,30	201,40	0,00	201,40



Şekil 9. 1984–2022 periyodunda gerçekleşen erozyon ve birikim alanları.

4.4. 2030 Yılı İçin Kıyı Çizgisi Konumunun Tahmini

2030 yılı için kıyı çizgisinin konumunun belirlenmesinde öncelikle ekstrapolasyonu yapılacak kıyı çizgisi değişim oranı belirlenmiştir. Bu amaçla EPR ve LRR yöntemlerinin tahmin performansları değerlendirilmiştir. 1984–2022 periyodunda LRR yönteminin tahmin doğruluğunun belirlenmesi için R^2 değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 8). Maiti ve Bhattacharya (2009) ve Kumar vd. (2010) takip edilerek $R^2 > 0,8$ eşik değeri kullanılmış, 153 transektin 116'sının (% 76) R^2 değerinin 0,8 eşik değerinin altında olduğu ve model tahmininde belirsizlik taşıdığı görülmüştür. EPR ile hem kısa periyotlar (1984–1990, 1990–1996, 1996–2002, 2002–2008, 2008–2015, 2015–2022) hem de genel değişim periyodu için (1984–2022) değerlendirme yapıldığından tahminde kullanılacak kıyı çizgisi değişim oranına karar vermek için farklı yıllardaki kıyı çizgisi değişim oranları arasındaki korelasyon araştırılmıştır (Çizelge 9). Periyotlar arasındaki düşük korelasyon zayıf tahmin olarak değerlendirilerek (Deepika vd., 2014; Ratner, 2009) kullanılacak periyoda karar verilmiştir.

Çizelge 9 incelendiğinde birbirini takip eden periyotlar arasındaki korelasyon değerlerinin çok düşük olduğu görülmektedir. En yüksek korelasyonun 0,68 değeri ile 2008–2015 ile 2015–2022 periyodu arasında olduğu belirlenmiştir. Buna göre 2008–2015 periyodundaki kıyı çizgisi değişimleri ile 2015–2022 periyodundaki değişimlerin benzer dinamikler gösterdiği anlaşılmıştır.

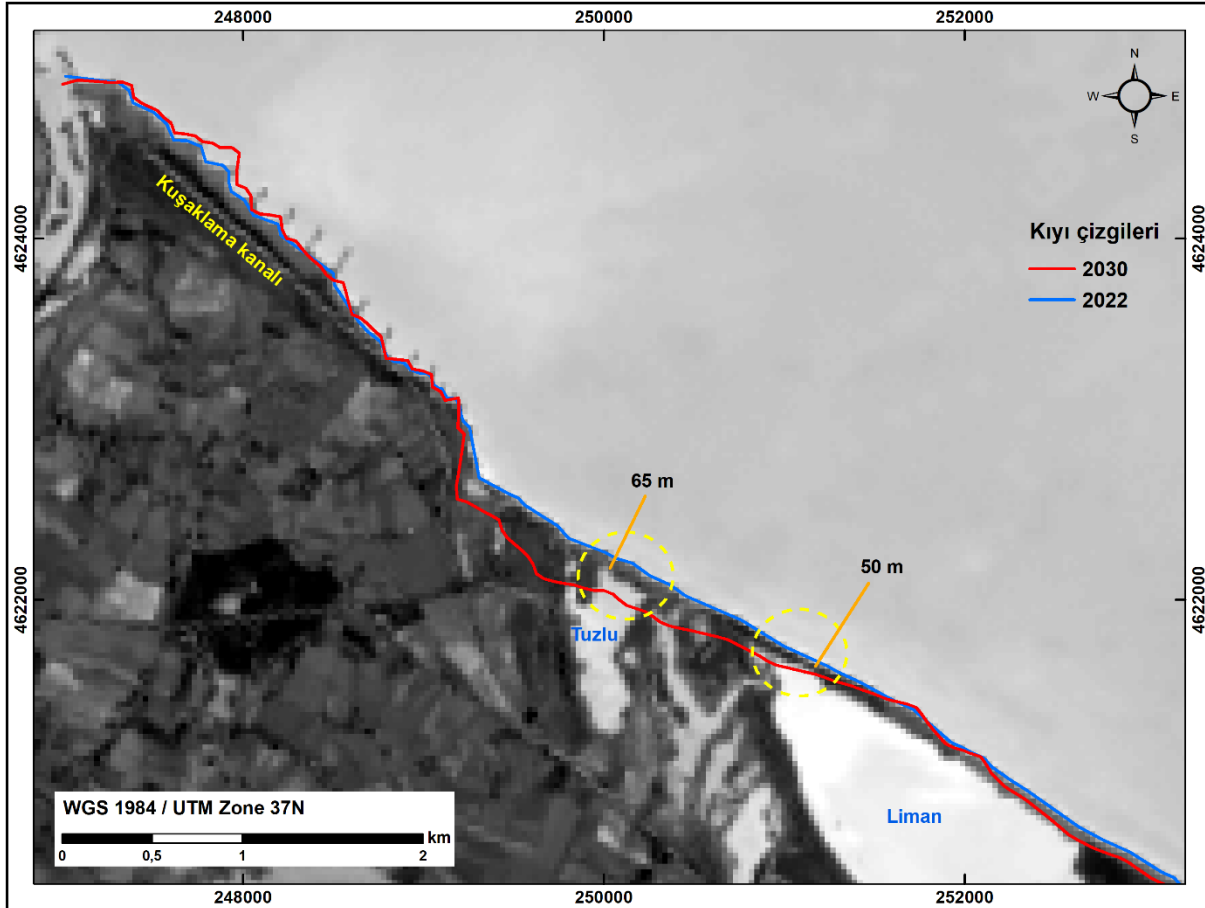
Çizelge 8. LRR için R^2 değerleri.

TNo	R^2	TNo	R^2	TNo	R^2	TNo	R^2	TNo	R^2	TNo	R^2	TNo	R^2
1	0,38	21	0,61	41	0,86	61	0,77	81	0,45	101	0,09	121	0,40
2	0,44	22	0,66	42	0,87	62	0,75	82	0,44	102	0,08	122	0,52
3	0,45	23	0,71	43	0,88	63	0,73	83	0,43	103	0,06	123	0,56
4	0,43	24	0,68	44	0,88	64	0,71	84	0,42	104	0,06	124	0,55
5	0,39	25	0,69	45	0,88	65	0,68	85	0,41	105	0,06	125	0,51
6	0,41	26	0,71	46	0,87	66	0,64	86	0,40	106	0,06	126	0,50
7	0,41	27	0,73	47	0,87	67	0,62	87	0,39	107	0,06	127	0,52
8	0,46	28	0,72	48	0,87	68	0,60	88	0,37	108	0,07	128	0,65
9	0,49	29	0,70	49	0,86	69	0,56	89	0,35	109	0,06	129	0,75
10	0,48	30	0,74	50	0,84	70	0,55	90	0,33	110	0,05	130	0,80
11	0,53	31	0,78	51	0,84	71	0,53	91	0,31	111	0,04	131	0,71
12	0,55	32	0,79	52	0,83	72	0,51	92	0,28	112	0,05	132	0,78
13	0,58	33	0,81	53	0,81	73	0,49	93	0,25	113	0,08	133	0,86
14	0,62	34	0,82	54	0,82	74	0,48	94	0,23	114	0,11	134	0,86
15	0,61	35	0,82	55	0,80	75	0,46	95	0,19	115	0,12	135	0,88
16	0,60	36	0,83	56	0,81	76	0,43	96	0,14	116	0,12	136	0,91
17	0,61	37	0,83	57	0,78	77	0,44	97	0,10	117	0,11	137	0,91
18	0,68	38	0,87	58	0,78	78	0,45	98	0,09	118	0,10	138	0,90
19	0,69	39	0,87	59	0,78	79	0,46	99	0,08	119	0,17	139	0,90
20	0,63	40	0,86	60	0,77	80	0,45	100	0,08	120	0,28	140	0,89

Çizelge 9. Farklı periyotlardaki kıyı çizgisi değişimleri arasındaki korelasyon.

	1984–1990	1990–1996	1996–2002	2002–2008	2008–2015	2015–2022
1984–1990	1	-0,15	0,66	-0,17	-0,25	-0,38
1990–1996		1	0,14	0,02	-0,41	-0,46
1996–2002			1	0,12	-0,30	-0,66
2002–2008				1	0,06	-0,19
2008–2015					1	0,68
2015–2022						1

Bu çalışmada transektlerdeki kıyı çizgisi değişimlerinin farklı periyotlardaki karakteristikleri dikkate alındığında gelecekteki kıyı çizgisi konumunu en iyi karakterize edeceği belirlenen 2015–2022 periyodu için EPR yöntemiyle elde edilen kıyı çizgisi değişim oranlarının 2022 yılı kıyı çizgisi baz alınarak 8 yıla göre ekstrapolasyonu ile 2030 yılı için kıyı çizgisinin konumu belirlenmiştir (Şekil 10). Burada belirlenen kıyı çizgisi, mevcut koşulların aynı kalması durumunda gelecek için öngörülen konumu göstermektedir.



Şekil 10. 2030 yılında kıyı çizgisinin tahmin edilen konumu.

2030 yılı için belirlenen kıyı çizgisi konumuna göre 2022–2030 periyodunda mahmuzların doğu bölümünün erozyondan çok fazla etkilenileceği ve maksimum erozyonun 270,8 m'yi

bulabileceği, gerçekleşebilecek erozyon neticesinde 2022 itibarıyla sırasıyla 65 m ve 50 m kıyı kordonu kalmış Tuzlu ve Liman Lagünlerinin denizle birleşebileceği öngörülmüştür. 2022–2030 periyodunda “simetrik fark” aracı kullanılarak çakıştırma analizi yapılmış, erozyonla kaybedilecek alan 51,48 ha ve birikim 7,05 ha olarak hesaplanmıştır.

5. Tartışma

Kızılırmak Deltasında kıyı erozyonundan en çok etkilenen bölge olan nehir ağzının doğusunda yaklaşık 8 km’lik bölümde 1984–2022 periyodunda meydana gelen kıyı çizgisi değişimlerinin erozyon ve birikimler yönünden ele alınarak incelenmesinde ve 2030 yılı için kıyı çizgisinin olası konumunun tahmininde birçok araştırmada başarıyla uygulanan EPR ve LRR yöntemleri (Aladwani, 2022; Awad ve El-Sayed, 2021; Deepika vd., 2014; Esmail vd., 2019; Islam ve Crawford, 2022; Kumar vd., 2010; Li vd., 2001; Mukhopadhyay vd., 2012; Nandi vd., 2016) kullanılmıştır.

1984–2022 genel periyodunda EPR ve LRR yöntemleriyle gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre sırasıyla -7,0 m/yıl ve -7,5 m/yıl ortalama kıyı çizgisi değişim hızı belirlenmiştir (Çizelge 5). Maksimum erozyon oranı ise EPR ve LRR için sırasıyla -16,2 m/yıl ve -19,6 m/yıl’dır. Çalışmada EPR ve LRR sonuçlarının birbirine büyük ölçüde benzer olduğu görülmüş ve aralarındaki Pearson korelasyon katsayı değeri 0,97 olarak hesaplanmıştır. EPR ve LRR sonuçları arasındaki yüksek korelasyon, Ozturk vd. (2015), Esmail vd. (2019), Awad ve El-Sayed (2021) ve Aladwani (2022) tarafından da bildirilmiştir. İki yöntem arasındaki kısmi farklılığın nedeni LRR yönteminde 1984–2022 periyodunda kıyı çizgisi bulunan tüm tarihlerin (1984, 1990, 1996, 2002, 2008, 2015 ve 2022) dikkate alınırken EPR yönteminde yalnızca 1984 ve 2022 tarihli kıyı çizgisine göre değerlendirme yapılmasıyla açıklanabilir.

Kısa periyotlar için EPR yöntemiyle yapılan analizlerde Çizelge 5’e göre deltaya yakın Altınkaya ve Derbent barajlarının inşa edildiği dönemleri içine alan 1984–1990 periyodunda -2,8 m/yıl, 1990–1996 periyodunda -4,1 m/yıl ortalama kıyı çizgisi değişim hızı belirlenmiştir. Kıyıda ilk aşamada inşa edilen üç adet mahmuzun etkisinin araştırıldığı 1996–2002 periyodunda -13,6 m/yıl, daha sonradan eklenen yedi adet mahmuzun etkisinin araştırıldığı 2002–2008 periyodunda -8,9 m/yıl, en son eklenen yedi mahmuzun etkisinin araştırıldığı 2008–2015 periyodunda -5,2 m/yıl ortalama kıyı çizgisi değişim hızı görülürken tüm mahmuzların tamamlanmasından sonraki 2015–2022 periyodunda -7,3 m/yıl ortalama kıyı çizgisi değişim hızı belirlenmiştir. Çizelge 5 ve 6’ya göre 1984–1990 periyodunda kıyının % 29’unda yüksek erozyon yaşanırken maksimum erozyon -47,0 m/yıl’dır. 1990–1996 periyodunda maksimum -60,0 m/yıl ile kıyının % 25’i, 1996–2002 periyodunda maksimum -57,3 m/yıl ile kıyının % 61’i, 2002–2008 periyodunda maksimum -63,0 m/yıl ile kıyının % 31’i, 2008–2015 periyodunda maksimum -39,8 m/yıl ile kıyının % 26’sı, 2015–2022 periyodunda maksimum -33,8 m/yıl ile kıyının % 49’u yüksek erozyona maruz kalmıştır. 2015–2022 periyodundaki analiz sonucuna göre kıyı erozyonundan korunmaya en çok ihtiyaç duyulan alanının 59–110 ve 132–153 nolu transektler olduğu anlaşılmıştır. Çalışmanın bulguları Kızılırmak Deltasında daha önce yapılan araştırmalarla (Ataol vd., 2019; Ozturk vd., 2015; Ozturk ve Sesli, 2015) tutarlı olarak erozyonun farklı periyotlarda devamlılığını ortaya çıkarmıştır. Ozturk vd. (2015) 1987 ve 2011 arasında EPR ile yaptığı incelemede maksimum erozyonun -75,9 m/yıl ile 1998–2002 periyodunda gerçekleştiğini belirlerken

2002–2007 ve 2007–2011 periyotlarında azalma olsa da erozyonun etkili olarak sürdüğünü belirtmiştir. Ozturk ve Sesli (2015) EPR ile 1962–1974, 1974–1987 ve 1987–2013 periyotları için sırasıyla -17,5 m/yıl, -32,9 m/yıl ve -25,6 m/yıl değerleriyle erozyonun devamlılığına dikkat çekmiştir. Ataol vd. (2019) ise 1975–1990 periyodunda -32,0 m/yıl olan maksimum erozyonun, 1990–2004 periyodunda -27,0 m/yıl ve 2004–2017 periyodunda ise -33,7 m/yıl ile sürdüğünü göstermiştir. Çalışmamızda 2015–2022 periyodu için belirlenen maksimum -33,8 m/yıl ile erozyonun devam ettiği ve 2017 yılından sonra -169 m'ye ulaşan kıyı erozyonu yaşandığı anlaşılmıştır.

Çizelge 7'ye göre alan hesabıyla 1984–1990 periyodunda 28,86 ha, 1990–1996 periyodunda 35,70 ha, 1996–2002 periyodunda 67,62 ha, 2002–2008 periyodunda 46,62 ha, 2008–2015 periyodunda 32,90 ha, 2015–2022 periyodunda 45,15 ha alan erozyonla kaybedilmiştir. Erozyonun bu derece fazla olması Ataol ve Köle (2016) tarafından işaret edildiği gibi deltadaki bataklık alanların erozyonun şiddetli olmasında etkili olmasına bağlanabilir. Şekil 9 incelendiğinde periyotlar ilerledikçe erozyonun doğu yönüne taşındığı görülmektedir. Bu durum nehir ağzından itibaren inşa edilen her mahmuzun kendi bulunduğu bölgeyi korurken erozyonun doğu yönüne ötelenmesine sebep olduğunu kanıtlamaktadır. Bu konuda Kökpınar vd. (2000) nehir ağzından doğuya doğru yapılacak yeni mahmuzların uzunluklarının giderek kısaltılması gerekliliğine işaret ederken, Ataol ve Köle (2016) 2002 yılında inşa edilen mahmuzlarda bu durumun dikkate alınmadığına ve bu durumun erozyonun devamlılığına neden olduğuna dikkat çekmiştir. Yüksek (2008) erozyon bölgelerinde batıdan doğuya doğru kısılacak şekilde mahmuz sistem planı önermiş, Ataol ve Köle (2016) son yapılan yedi mahmuzun bu öneri doğrultusunda uzunluklarının kısılacak şekilde inşasıyla deltadaki kuşaklama kanalının korunmaya çalışıldığını belirtmiştir. Gerçekleştirdiğimiz çalışmada 1984–2022 periyodunda 201,40 ha alanın erozyonla kaybedildiği belirlenmiştir. Tuzlu ve Liman lagünlerinin güncel olarak sırasıyla sadece 65 m ve 50 m kıyı kordonu kalmıştır.

Kızılırmak Deltasında daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak gelecek bir tarih için kantitatif yaklaşımlarla kıyı çizgisinin konumunun tahmini yapılmıştır. Ayrıca çalışma alanında EPR ve LRR yöntemlerinin tahmin için potansiyelleri irdelenerek gelecekteki konumu en iyi modelleyebilecek yaklaşımın kullanılması benimsenmiştir. Yapılan değerlendirmede Nandi vd., (2016), Esmail vd. (2019), Awad ve El-Sayed (2021), Aladwani (2022)'ye benzer olarak çalışma alanında EPR yönteminin LRR yöntemine göre daha iyi tahmin performansı gösterdiği belirlenmiştir. LRR yönteminde analiz periyodunun uzun olması (38 yıl) ve yıllar içinde kademeli olarak inşa edilen mahmuzlar nedeniyle erozyonun sürekli olarak doğuya kayması nedeniyle kıyı çizgisi değişiminde sistematik bir durum oluşmaması belirsizliği artırmıştır. EPR yöntemi ise farklı periyotların değerlendirmeye alınabilme olanağı ile daha esnek bir çözüm sağlamıştır. Bu kapsamda model tahmininde belirsizlik gösteren LRR ile arasındaki yüksek korelasyon bulunan 1984–2022 genel periyodu EPR değerleri yerine kısa periyot EPR değerlerinin kullanılması gerekmiştir. 2015–2022 kısa periyodundan elde edilen değerlerle 2030 yılı için kıyı çizgisi tahmini (Şekil 10) kuşaklama kanalının korunduğunu ancak erozyonun doğu yönüne ilerleyerek mahmuzları takip eden kıyılarda yeni tehlikeler yarattığını göstermiştir. İnşa edilen mahmuzların sadece bulunduğu bölgede koruma sağlayıp erozyonu doğusuna taşıması nedeniyle önlem alınmadığı takdirde 2030 yılı tahminine göre kıyı çizgisinin 2022 yılındaki konumuna göre -270,8 m'yi bulabilecek ölçüde kara yönünde gerilemesi

ve 51,48 ha alanın kıyı erozyonu nedeniyle kaybedilmesi beklenmektedir. Bu durumda Tuzlu ve Liman lagünlerini denizden ayıran kıyı kordonunun erozyonla kaybolup lagünlerin denizle birleşme tehlikesi yüksektir. Ancak bu tahmin model bazlı olduğu için sonucun kesin olduğunu söyleyememekle birlikte gelecek için bir öngörü oluşturabiliriz.

Bu çalışmada ele alınan EPR ve LRR yöntemleri gelişmiş modellere ihtiyaç duyulmadan değerlendirme yapılabilmesi açısından oldukça önemlidir. Buna karşın özellikle kıyı çizgisinin gelecekteki konumun tahmini mevcut koşulların devam edeceği varsayımına dayanmakta olup olası antropojenik etkiler karşısında belirsizlik taşımaktadır. Çalışmamız açısından diğer önemli kısıt ise uydu görüntülerinin çözünürlüğü olmuştur. Uzaktan algılama geniş kapsama alanı ve zamansal veri sağlasa da yüksek çözünürlüklü veriler 2000’li yıllardan sonra edinilebildiğinden bu çalışmada olduğu gibi uzun periyotlar için zamansal değişimlerin belirlenmesinde en önemli sorun yüksek çözünürlüklü tarihsel verilerin varlığıdır. Landsat verileri ise orta çözünürlüklü görüntüler için en eski tarihli verileri kapsayan en büyük veri tabanını oluştur (Esmail vd., 2019). Bu çalışmada geniş zaman aralıklarında gerçekleşen değişimler araştırıldığından ve alanda belirgin değişimler yaşandığından Landsat-5 TM/Landsat-8 OLI/Landsat-9 OLI-2 uydu görüntüleri çalışma açısından yeterli çözünürlük sağlamıştır.

6. Sonuç ve Öneriler

Kıyı çizgisi değişimlerinin analizi ve gelecekteki değişimlerin tahmin modelleri kıyı alanlarının daha iyi anlaşılması, planlanması ve yönetilmesine yardımcı olabilir. Bu çalışmada barajlar ve kıyı koruma yapılarının inşası nedeniyle Kızılırmak Deltasında ciddi kıyı erozyonu probleminin yaşandığı 8 km uzunluğundaki bölgede uzaktan algılama, CBS ve istatistiksel yöntemler ile 1984–2022 periyodunda 38 yılda gerçekleşen değişimler belirlenmiş, 2030 yılı için kıyı çizgisi konumunun tahmini yapılmıştır. Çalışmada Landsat-5 TM/Landsat-8 OLI/Landsat-9 OLI-2 uydu görüntüleri kullanılmış, EPR ve LRR yöntemleriyle kıyı çizgisi değişimleri analiz edilmiştir. Analizler sonucunda 1984–2022 periyodunda EPR yöntemiyle -7,0 m/yıl, LRR yöntemiyle -7,5 m/yıl ortalama erozyon hızı belirlenmiştir. Maksimum erozyon hızı ise EPR ile -16,2 m/yıl, LRR ile -19,6 m/yıl olarak hesaplanmıştır. 1984–2022 periyodunda erozyon nedeniyle kaybedilen alan 201,40 ha’dır. Genel periyot 1984–1990, 1990–1996, 1996–2002, 2002–2008, 2008–2015 ve 2015–2022 periyotlarına bölünerek incelendiğinde barajların etkisiyle oluşan erozyonu durdurmak amacıyla inşa edilen mahmuzların bulunduğu bölgede etkili olurken, erozyonu daha doğusuna kaydırıldığı ve tam bir koruma sağlamadığını ortaya çıkarmıştır. EPR yöntemine göre maksimum erozyon 1984–1990 periyodunda -47,0 m/yıl, 1990–1996 periyodunda -60,0 m/yıl, 1996–2002 periyodunda -57,3 m/yıl, 2002–2008 periyodunda -63,0 m/yıl, 2008–2015 periyodunda -39,8 m/yıl ve 2015–2022 periyodunda -33,8 m/yıl olarak hesaplanmıştır. Çalışma alanı boyunca koruma ve tedbir gerektirecek alanları vurgulamak ve önceliklendirmek için transekt bazında erozyon/birikim dereceleri belirlenmiştir. İncelenen 8 km uzunluğundaki kıyının 1984–2022 periyodunda EPR yöntemine göre %57’si, LRR yöntemine göre %50’si yüksek erozyon derecesine sahiptir.

2015–2022 periyodunda EPR yöntemleriyle elde edilen kıyı çizgisi değişim oranlarının ekstrapolasyonu ile 2030 yılı kıyı çizgisi tahmini yapılmıştır. Gerekli önlemler alınmadığı takdirde

2030 yılına kadar -270,8 m'yi bulacak erozyon nedeniyle Tuzlu ve Liman lagünlerinin yok olma tehlikesi bulunmaktadır. Kıyı çizgisinin gelecekteki konumunun tahmini, kıyının erozyon nedeniyle önemli ölçüde zarar görebilecek kısımların belirlenmesinde ve yapay kıyı beslemesi gibi acil koruma sağlamak üzere alan yönetiminde rehber niteliğindedir. Bununla birlikte EPR yöntemiyle model bazlı yapılan tahmin, bir ön çalışma niteliğinde olduğundan daha sonra ileri bir aşama olarak bu tehlike alanlarında sayısal modeller uygulanabilir.

Sonuçlar, çalışma alanına özgü olmakla birlikte, kıyı çizgisi değişimlerinin belirlenerek kıyı çizgisi konumunun tahmininde izlenecek stratejiler hakkında bilgi sağlayabilir. Özellikle uzun periyotlar için, ücretsiz olarak erişilen orta çözünürlüklü Landsat görüntülerinden EPR ve LRR modelleri ile kıyı çizgisi değişimlerinin analizi ve gelecek tarihlerdeki olası senaryoların haritalandırılma potansiyelini ortaya çıkarması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda antropojenik etkilerin yüksek olduğu ve kıyı çizgisi değişimlerinin takibinin kritik olduğu alanlarda hızlı ve ekonomik olarak veri sağlayarak analizler gerçekleştirilebilir. Bununla birlikte, kısa periyotlar için ve kıyı çizgisi değişimlerinin fazla olmadığı çalışmalarda daha yüksek çözünürlüklü uydu görüntülerinin kullanılması önerilir.



Analysis of Shoreline Changes in Kızılırmak Delta Using EPR and LRR Methods for the Period 1984–2022, and Prediction for the Year 2030

Derya Öztürk*^a, Sibel Uzun^b

Submitted: 05.06.2023

Accepted: 12.07.2023

EXTENDED ABSTRACT

1. Introduction

Monitoring shoreline changes is crucial in coastal risk management and planning (Guerrera et al., 2021). Shoreline change analysis involves calculating changes over a specific period based on a set of shorelines (Burningham and Fernandez-Nunez, 2020; Dereli and Tercan, 2020). End Point Rate (EPR) and Linear Regression Rate (LRR) methods are widely utilized techniques in shoreline change analysis (Awad and El-Sayed, 2021; Bheeroo et al., 2016; Warnasuriya et al., 2018; Weerasingha and Ratnayake, 2022; Zagórski et al., 2020). These methods can also be employed to predict future shorelines in coastal surveys (Aladwani, 2022; Basheer Ahammed and Pandey, 2022; Fenster et al., 1993; Islam and Crawford, 2022). The underlying approach involves extrapolating rates of change (Basheer Ahammed and Pandey, 2022; Islam and Crawford, 2022; Mukhopadhyay et al., 2012).

As deltas are highly active areas in terms of sedimentology, they undergo significant shoreline changes (Anthony, 2015; Köle and Ataol, 2016). The Kızılırmak Delta, the third largest coastal plain in Turkey, has formed over thousands of years through the deposition of alluvium carried by the Kızılırmak River (Ataol and Köle, 2016; Can and Taş, 2012; Turoğlu, 2010; Yılmaz, 2005). Recently, the sediment budget of the Kızılırmak Delta has experienced a deficit due to dam construction on the Kızılırmak River and the extraction of sand and gravel from the river beds. Initially, the delta's growth ceased, and subsequently, the delta started losing area due to coastal erosion (Turoğlu, 2010; Zeybek et al., 2018). Various coastal structures have been constructed in the Kızılırmak Delta to mitigate coastal erosion, but these structures have disrupted the flow pattern and caused significant changes in the shoreline (Zeybek et al., 2018).

This study aims to quantitatively determine the shoreline changes and predict the potential future position of the shoreline by employing remote sensing, Geographical Information System (GIS), and statistical techniques in order to facilitate better management planning for future development activities in the eastern part of the Kızılırmak Delta, which is most affected by coastal erosion (approximately 8 km-long from the river mouth).

* **Corresponding Author:** dozturk@omu.edu.tr

^a Ondokuz Mayıs University, Faculty of Engineering, Department of Geomatics Engineering, Samsun/Türkiye, <http://orcid.org/0000-0002-0684-3127>

^b Ondokuz Mayıs University, Faculty of Engineering, Department of Geomatics Engineering, Samsun/Türkiye, <http://orcid.org/0000-0001-5814-7054>

2. Methodology

2.1. Data

Landsat-5 TM, Landsat-8 OLI, and Landsat-9 OLI-2 satellite images from 1984, 1990, 1996, 2002, 2008, 2015, and 2022 were utilized for the shoreline change analysis covering the period from 1984 to 2022, as well as for the prediction of 2030 in the Kızılırmak Delta.

2.2. Determining Shorelines

The Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) (Equation 1) was employed to extract shorelines from the satellite images. The threshold values were determined using reference pixels in the images, and based on these threshold values, the MNDWI index image was classified into land and water. The resulting raster images were converted to vector format, and the shorelines (Figure 1) were obtained for further analysis.

$$MNDWI = (Green - MIR)/(Green + MIR) \quad (1)$$

In Equation 1; “Green” is the reflectance value in the green band and “MIR” in the mid-infrared band.

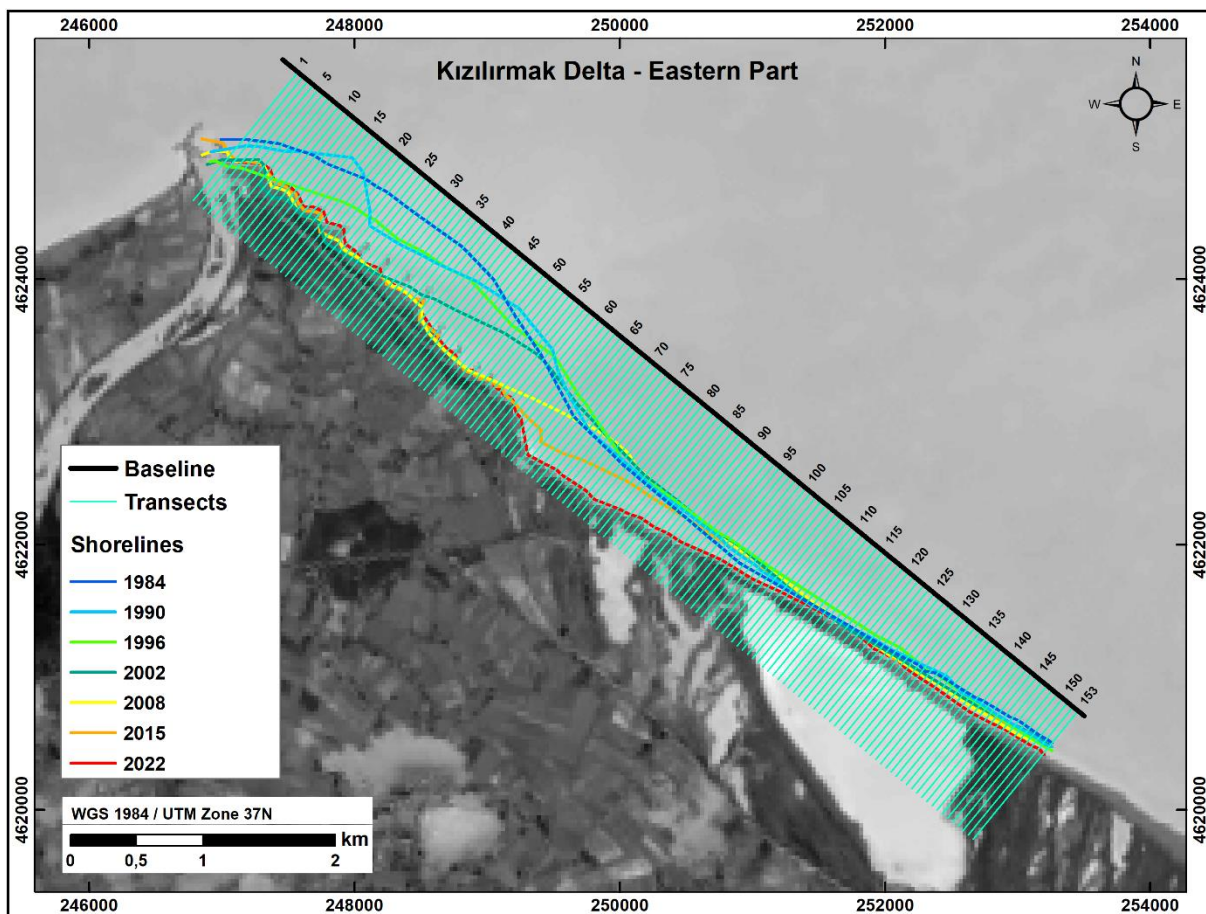


Figure 1. Shorelines and transects.

2.3. Shoreline Change Analysis

For shoreline change analyses, a baseline approximately parallel to all shorelines and 153 transects at 50 m intervals perpendicular to the baseline were created (Figure 1). The intersection points of the transects with all shorelines were determined, and the distances from the baseline were recorded in the database. Shoreline change analyses were conducted using the End Point Rate (EPR) and the Linear Regression Rate (LRR) methods. Shoreline change rates were classified into erosion and accretion degrees, following the scale in Chenthamil Selvan et al. (2016) and Baral et al. (2018). The surface areas of erosion and accretion were also calculated based on the shorelines using overlay analysis.

By analyzing the short-term changes (1984–1990, 1990–1996, 1996–2002, 2002–2008, 2008–2015, and 2015–2022) using the EPR method, the acceleration/deceleration conditions of coastal erosion during different periods were determined. The overall change from 1984 to 2022 was determined using both the EPR and LRR methods. The EPR is calculated by dividing the distance between the shorelines on two different dates by the time interval (Equation 2) (Song et al., 2021). In the LRR method, the rate of change is determined by fitting a least squares regression line to all shoreline points for a given transect (Equation 3) (Baig et al., 2020; Dey and Jena, 2021; Esmail et al., 2019; Song et al., 2021).

$$EPR = \frac{(L_2 - L_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (2)$$

In Equation 2, L_1 and L_2 represent the distances of the old and new shorelines from the baseline, respectively, and t_1 and t_2 are the old and new dates, respectively (Song et al., 2021).

$$L = mx + b \quad (3)$$

In Equation 3, L is the dependent variable representing the spatial location of the shoreline (the distance from the baseline to the shoreline for a transect), x is the independent variable denoting the date, b is the intersection point, and m is the slope representing the change in L corresponding to the change in x per unit (shoreline change rate determined as linear regression rate) (Baig et al., 2020; Das et al., 2021; Elfadaly et al., 2022).

2.4. Shoreline Prediction

The position of the shoreline at a future date is predicted using the rate of shoreline change (slope), the time interval between the observed and the predicted shoreline, and the model intercept value as specified in Equation 4 (Aladwani, 2022; Awad and El-Sayed, 2021; Deepika et al., 2014; Kumar et al., 2010; Li et al., 2001; Nandi et al., 2016). In this study, the position of the shoreline for 2030 was predicted according to the EPR shoreline change rates in the 2015–2022 period.

$$\text{Future shoreline position} = \text{Rate of change} \times \text{Time interval} + \text{Intersection} \quad (4)$$

According to Equation 4, the shoreline position for the prediction date can be determined by adding the potential change that can occur over the elapsed time to the shoreline position at the latest date for each transect.

3. Results and Discussion

3.1. Shoreline Changes

Short-term (P1:1984–1990, P2:1990–1996, P3:1996–2002, P4:2002–2008, P5:2008–2015, and P6:2015–2022) shoreline changes were analyzed using EPR. Maximum erosion was -47.0 m/year in transect 24 in 1984–1990, -60.0 m/year in transect 15 in 1990–1996, -57.3 m/year in transect 24 in 1996–2002, -63.0 m/year in transect 50 in 2002–2008, -39.8 m/year in transect 68 in 2008–2015, and -33.8 m/year in transect 77 in 2015–2022. For the whole period (Pg:1984–2022), maximum erosion developed in transect 43 with -16.2 m/year according to the EPR method, and in transect 44 with -19.6 m/year according to the LRR method. The primary statistical information from the EPR and LRR results is provided in Table 1. In Table 1, negative (-) values indicate erosion (regression towards the land direction) and positive (+) values indicate accretion (advance towards the sea).

Table 1. Summary of the statistical data of the shoreline change rate (m/year) based on the EPR and LRR methods.

	EPR							LRR
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Pg	Pg
The number of transects with a shoreline change rate <0	64	73	120	98	103	107	153	153
The average for transects with a shoreline change rate <0 (m/year)	-15,2	-16,5	-18,8	-15,8	-9,1	-12,1	-7,0	-7,5
The maximum for transects with a shoreline change rate <0 (m/year)	-47,0	-60,0	-57,3	-63,0	-39,8	-33,8	-16,2	-19,6
The minimum for transects with a shoreline change rate <0 (m/year)	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,4
The number of transects with a shoreline change rate ≥0	89	80	33	55	50	46	-	-
The average for transects with a shoreline change rate ≥0 (m/year)	6,0	7,2	5,2	3,5	2,7	3,9	-	-
The maximum for transects with a shoreline change rate ≥0 (m/year)	18,8	15,1	17,3	15,0	8,3	15,0	-	-
The minimum for transects with a shoreline change rate ≥0 (m/year)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	-	-
The average change rate for all transects (m/year)	-2,8	-4,1	-13,6	-8,9	-5,2	-7,3	-7,0	-7,5

According to erosion and accretion degrees, there was a high erosion in 29% of the study area in 1984–1990, 25% in 1990–1996, 61% in 1996–2002, 31% in 2002–2008, % 26 in 2008–2015, and 49% in 2015–2022 period. Regarding the general evaluation in the 1984–2022 period, high erosion occurred in 57% according to the EPR method and 50% according to the LRR method.

Based on the annual erosion, the highest erosion occurred with 11.27 hectares in 1996–2002, and the highest accretion with 2.89 hectares in 1990–1996.

3.2. Prediction of Shoreline for 2030

In determining the shoreline position for 2030, the prediction performances of the EPR and LRR methods were initially evaluated. In this study, the shoreline change rates obtained by the EPR method for the 2015–2022 period were used to predict 2030.

The predicted shoreline for 2030 shows that the interception channel can be preserved, but erosion may move eastward, creating new hazards on the coasts ahead after the spurs. Since the spurs only provide protection in the region and carry erosion to the east, unless precautions are taken, it is expected that the shoreline can regress to -270.8 m compared to its position in 2022, and 51.48 hectares may be lost due to coastal erosion, according to the 2030 prediction. In such a case, there is a high risk that the barrier spits separating Tuzlu and Liman lagoons from the sea may be lost by erosion

and the lagoons may merge with the sea. However, since this prediction is model-based, we cannot say that the result is certain, but we can create a prediction for the future.

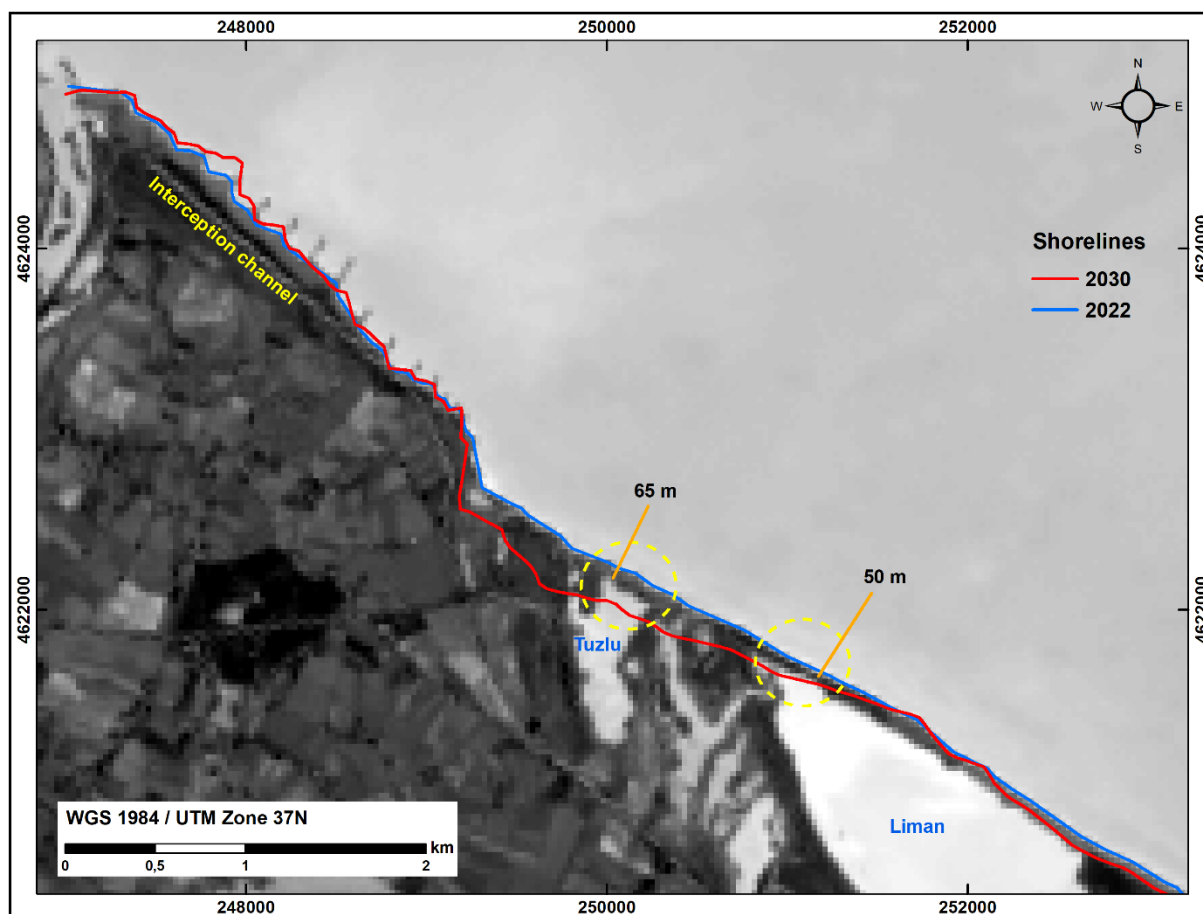


Figure 2. The predicted position of the shoreline for 2030.

The EPR and LRR methods discussed in this study are very important in making evaluations without the need for advanced models. However, it is essential to note that the prediction of the future location of the shoreline is based on the assumption that current conditions will continue, and it carries uncertainty in the face of possible anthropogenic effects.

4. Conclusion

In the 8 km-long region where a serious coastal erosion problem is experienced in the Kızılırmak Delta, the changes in the 1984–2022 period were determined using remote sensing, GIS and statistical methods, and the shoreline location for 2030 was estimated. The analysis revealed an average erosion rate of -7.0 m/year using the EPR method and -7.5 m/year using the LRR method from 1984–2022. The maximum erosion rate was calculated as -16.2 m/year using EPR and -19.6 m/year using LRR. In the 1984–2022 period, 57% of the coast according to the EPR method and 50% according to the LRR method showed a high degree of erosion. The area lost due to erosion in the 1984–2022 period is 201.40 ha. When the overall period is divided into the periods of 1984–1990, 1990–1996, 1996–2002, 2002–2008, 2008–2015, and 2015–2022, it is observed that the spurs

constructed to halt erosion caused by the dams are effective in the region where they are located, but they also shift erosion further eastward and do not provide complete protection.

A shoreline prediction for the year 2030 was made by extrapolating the rates of shoreline changes obtained through EPR methods during the period of 2015–2022. If necessary precautions are not taken, there is a risk of the Tuzlu and Liman lagoons disappearing due to erosion, which could reach -270.8 m by the year 2030. The estimation of the future location of the shoreline serves as a guide in identifying parts of the shoreline that could be significantly damaged by erosion and in site management to provide immediate protection such as artificial beach nourishment. However, since the model-based estimation using the EPR method is a preliminary study, numerical models can be applied in these hazard areas as an advanced stage. While the results are site-specific, they can provide information on strategies to follow in estimating shoreline location by identifying shoreline changes.

Referanslar/ References

- 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
- Ankrah, J., Monteiro, A., Madureira, H. (2022). Bibliometric analysis of data sources and tools for shoreline change analysis and detection. *Sustainability*, 14 (9), 4895. doi: 10.3390/su14094895
- Anthony, E. J. (2015). Deltas. In G. Masselink, R. Gehrels (Eds.), *Coastal Environments and Global Change*, 299–337. doi: 10.1002/9781119117261.ch13
- Ataol, M., Kale, M. M., Tekkanat, İ. S. (2019). Assessment of the changes in shoreline using digital shoreline analysis system: a case study of Kızılırmak Delta in northern Turkey from 1951 to 2017. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1–9. doi: 10.1007/s12665-019-8591-7
- Ataol, M., Köle, M. (2016). Kızılırmak Deltası'nda 2000–2015 yılları arasında gözlenen kıyı erozyonu. GEOMED 2016 4th International Geography Symposium, Antalya, Turkey, 23–26 May 2016.
- Athearn, W. D., Ronne, F. C. (1963). Shoreline changes at Cape Hatteras: An aerial photographic study of a 17-year period. *Naval Research Reviews*, 6, 17–24.
- Atkinson, P. M. (2001). Super-resolution target mapping from softclassified remotely sensed imagery. Proceeding of the 6th International Conference on Geocomputation, University of Queensland, Brisbane, Australia, 24–26 September 2001.
- Awad, M., El-Sayed, H. M. (2021). The analysis of shoreline change dynamics and future predictions using automated spatial techniques: Case of El-Omayed on the Mediterranean coast of Egypt. *Ocean & Coastal Management*, 205, 105568. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105568
- Baig, M. R. I., Ahmad, I. A., Shahfahad, Tayyab, M., 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
- Baral, R., Pradhan, S., Samal, R. N., 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
- Barrett, J. P. (1974). The coefficient of determination—some limitations. *The American Statistician*, 28(1), 19–20. doi: 10.1080/00031305.1974.10479056
- Basheer Ahammed, K., 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
- Bheeroo, R. A., Chandrasekar, N., Kaliraj, S., Magesh, N. (2016). Shoreline change rate and erosion risk assessment along the Trou Aux Biches–Mont Choisy beach on the northwest coast of Mauritius using GIS-DSAS technique. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1–12. doi: 10.1007/s12665-016-5311-4
- Boak, E. H., Turner, I. L. (2005). Shoreline definition and detection: a review. *Journal of Coastal Research*, 21 (4), 688–703. doi: 10.2112/03-0071.1

- Burningham, H., Fernandez-Nunez, M. (2020). Shoreline change analysis. In *Sandy Beach Morphodynamics*, 439–460. Elsevier.
- Can, Ö., 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.
- Chenthamil Selvan, S., Kankara, R., Markose, V. J., Rajan, B., Prabhu, K. (2016). Shoreline change and impacts of coastal protection structures on Puducherry, SE coast of India. *Natural Hazards*, 83, 293–308. doi: 10.1007/s11069-016-2332-y
- Christmann, E. P., Badgett, J. L. (2009). *Interpreting assessment data: Statistical techniques you can use*. NSTA Press.
- Das, S. K., Sajan, B., Ojha, C., 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
- Deepika, B., Avinash, K., 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
- Dereli, M. A., Tercan, E. (2020). Assessment of shoreline changes using historical satellite images and geospatial analysis along the Lake Salda in Turkey. *Earth Science Informatics*, 13 (3), 709–718. doi: 10.1007/s12145-020-00460-x
- Dey, M., Jena, B. (2021). A shoreline change detection (2012–2021) and forecasting using digital shoreline analysis system (DSAS) tool: a case study of Dahej Coast, Gulf of Khambhat, Gujarat, India. *Indonesian Journal of Geography*, 53 (2), 295–309. doi: 10.22146/ijg.56297
- Dolan, R., Fenster, M. S., Holme, S. J. (1991). Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7 (3), 723–744.
- Dutta, D., Kumar, T., Jayaram, C., Akram, W. (2022). Shoreline change analysis of Hooghly Estuary using multi-temporal Landsat data and Digital Shoreline Analysis System. In *Geographic Information Systems and Applications in Coastal Studies*. IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.103030
- Elfadaly, A., Abutaleb, K., Naguib, D. M., 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
- Esmail, M., Mahmud, W. E., Fath, H. (2019). Assessment and prediction of shoreline change using multi-temporal satellite images and statistics: Case study of Damietta coast, Egypt. *Applied Ocean Research*, 82, 274–282. doi: 10.1016/j.apor.2018.11.009
- Fenster, M. S., Dolan, R., Elder, J. F. (1993). A new method for predicting shoreline positions from historical data. *Journal of Coastal Research*, 9 (1), 147–171. <https://www.jstor.org/stable/4298075> adresinden alınmıştır.
- Guerrera, F., Martín-Martín, M., Tramontana, M., Nimón, B., Essotina Kpémoua, K. (2021). Shoreline changes and coastal erosion: The case study of the coast of Togo (Bight of Benin, West Africa Margin). *Geosciences*, 11 (2), 40. doi: 10.3390/geosciences11020040
- Gulliver, F. P. (1899). Shoreline topography. In *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences*, 34 (8), 151–258.
- Hay, B. J. (1994). Sediment and water discharge rates of Turkish Black Sea rivers before and after hydropower dam construction. *Environmental Geology*, 23 (4), 276–283. doi: 10.1007/BF00766743
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., Farris, A. S. (2018). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0 user guide: U.S. Geological Survey Open-File Report 2018–1179*.
- Islam, M. S., Crawford, T. W. (2022). Assessment of spatio-temporal empirical forecasting performance of future shoreline positions. *Remote Sensing*, 14 (24), 6364. doi: 10.3390/rs14246364
- Kokpınar, M., Guler, I., Darama, Y. (2000). Bafra Ovası Kızılırmak-Karadeniz birlesimindeki kıyı erozyonunun incelenmesi. *III. Ulusal Kıyı Muhendisliği Sempozyumu*, 507–524.
- Köle, M. M., Ataoğlu, M. (2016). Yeşilirmak Deltası'nda 2000–2016 yılları arasında gözlenen kıyı erozyonu. GEOMED 2016 4th International Geography Symposium, Antalya, Turkey, 23–26 May 2016.
- Kuleli, T., Guneroglu, A., Karsli, F., Dihkan, M. (2011). Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey. *Ocean Engineering*, 38 (10), 1141–1149. doi: 10.1016/j.oceaneng.2011.05.006
- Kumar, A., Narayana, A., Jayappa, K. (2010). Shoreline changes and morphology of spits along southern Karnataka, west

- coast of India: A remote sensing and statistics-based approach. *Geomorphology*, 120 (3–4), 133–152. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.02.023
- Li, R., Liu, J.-K., 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
- 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. doi: 10.5772/intechopen.81789
- Mahapatra, M., Ratheesh, R., Rajawat, A. (2014). Shoreline change analysis along the coast of South Gujarat, India, using digital shoreline analysis system. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 42, 869–876. doi: 10.1007/s12524-013-0334-8
- Maiti, S., Bhattacharya, A. K. (2009). Shoreline change analysis and its application to prediction: A remote sensing and statistics based approach. *Marine Geology*, 257 (1–4), 11–23. doi: 10.1016/j.margeo.2008.10.006
- Mukhopadhyay, A., Mukherjee, S., Mukherjee, S., Ghosh, S., Hazra, S., Mitra, D. (2012). Automatic shoreline detection and future prediction: A case study on Puri Coast, Bay of Bengal, India. *European Journal of Remote Sensing*, 45 (1), 201–213. doi: 10.5721/EuJRS20124519
- Murray, J., Adam, E., Woodborne, S., Miller, D., Xulu, S., 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
- Nandi, S., Ghosh, M., Kundu, A., Dutta, D., Baksi, M. (2016). Shoreline shifting and its prediction using remote sensing and GIS techniques: a case study of Sagar Island, West Bengal (India). *Journal of Coastal Conservation*, 20, 61–80. doi: 10.1007/s11852-015-0418-4
- Nazeer, M., Waqas, M., Shahzad, M. I., Zia, I., Wu, W. (2020). Coastline vulnerability assessment through landsat and cubesats in a coastal mega city. *Remote Sensing*, 12 (5), 749. doi: 10.3390/rs12050749
- Nikolakopoulos, K., Kyriou, A., Koukouvelas, I., Zygouri, V., Apostolopoulos, D. (2019). Combination of aerial, satellite, and UAV photogrammetry for mapping the diachronic coastline evolution: the case of Lefkada Island. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8 (11), 489. doi: 10.3390/ijgi8110489
- Oyedotun, T. D. T. (2014). Shoreline geometry: DSAS as a tool for historical trend analysis. In *Geomorphological Techniques*, 3, 1–12.
- Ozturk, D., Beyazit, I., Kilic, F. (2015). Spatiotemporal analysis of shoreline changes of the Kızılırmak Delta. *Journal of Coastal Research*, 31 (6), 1389–1402. doi: 10.2112/JCOASTRES-D-14-00159.1
- Ozturk, D., Sesli, F. A. (2015). Shoreline change analysis of the Kızılırmak Lagoon Series. *Ocean & Coastal Management*, 118, 290–308. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2015.03.009
- Özdemir, S. (2010). *Kızılırmak Deltasında aktüel kıyı çizgisi değişiklikleri ve sonuçları* [Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü]. https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/TezGoster?key=veR1mHu9yoWjwcVUjCEoPEIzvN6DuyGMCUiNQL-5wi4RbdEcVoMji9yu_jX6kg4k adresinden alınmıştır.
- Profillidis, V., Botzoris, G. (2019). Statistical methods for transport demand modeling. In *Modeling of Transport Demand* (163–224). Elsevier. doi: 10.1016/B978-0-12-811513-8.00005-4
- Ratner, B. (2009). The correlation coefficient: Its values range between+ 1/– 1, or do they?. *Journal of Targeting, Measurement and Analysis for Marketing*, 17 (2), 139–142. doi: 10.1057/jt.2009.5
- Roy, S., Mahapatra, M., Chakraborty, A. (2018). Shoreline change detection along the coast of Odisha, India using digital shoreline analysis system. *Spatial Information Research*, 26, 563–571. doi: 10.1007/s41324-018-0199-6
- Sertel, E., Findik, N., Kaya, S., Seker, D. Z., Samsunlu, A. (2008). Assessment of landscape changes in the Kızılırmak Delta, Turkey, using remotely sensed data and GIS. *Environmental Engineering Science*, 25 (3), 353–362. doi: 10.1089/ees.2006.0149
- Sirat, A., Sezer, İ., Akay, H. (2012). Kızılırmak Deltası'nda organik çeltik tarımı. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (2), 76–92. <https://dergipark.org.tr/pub/gumusfenbil/issue/7481/98615> adresinden alınmıştır.
- Song, Y., Shen, Y., Xie, R., Li, J. (2021). A DSAS-based study of central shoreline change in Jiangsu over 45 years. *Anthropocene Coasts*, 4 (1), 115–128. doi: 10.1139/anc-2020-0001.
- Tabiat Varlıklarını Koruma Genel Müdürlüğü (2019). *Samsun Kızılırmak Deltası Doğal Sit Alanları Sulak Alan ve Kuş Cenneti: 2019–2023 Yönetim Planı*.

- Tanner, W. F. (1978). *Standards for measuring shoreline change*. Department of Geology, Florida State University, Tallahassee, FL, USA.
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., Ergul, A. (2009). *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change: Geological Survey Open-File Report 2008-1278*.
- Turoğlu, H. (2010). Kızılırmak Deltası ve yakın çevresinin jeomorfolojik özellikleri ve insan yaşamındaki etkileri. *Anadolu Araştırmaları*, 19 (1), 99-111. <https://dergipark.org.tr/pub/iuanadolu/issue/1162/13625> adresinden alınmıştır.
- USGS (2022). *Landsat Collection 2 Level-2 Science Products*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products> adresinden alınmıştır.
- USGS (2023). *Earth Explorer*. <https://earthexplorer.usgs.gov/> adresinden alınmıştır.
- Uzun, A. (2005). Samsun İli kıyılarında antropojenik değişimler. TUQUA Türkiye Kuvaterner Sempozyumu V, İstanbul Teknik Üniversitesi, Avrasya Yerbilimleri Enstitüsü, İstanbul, 02-05 Haziran 2005.
- Warnasuriya, T. W. S., Gunaalan, K., Gunasekara, S. S. (2018). Google earth: A new resource for shoreline change estimation—Case study from Jaffna Peninsula, Sri Lanka. *Marine Geodesy*, 41 (6), 546-580. doi: 10.1080/01490419.2018.1509160
- Weerasingha, W. A. D. B., Ratnayake, A. S. (2022). Coastal landform changes on the east coast of Sri Lanka using remote sensing and geographic information system (GIS) techniques. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 26, 100763. doi: 10.1016/j.rsase.2022.100763
- Wicaksono, A., Wicaksono, P., Khakhim, N., Farda, N. M., Marfai, M. A. (2019). Semi-automatic shoreline extraction using water index transformation on Landsat 8 OLI imagery in Jepara Regency. Sixth International Symposium on LAPAN-IPB Satellite.
- 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
- Xu, J. (2020). *Developments in management science in engineering 2018: perspectives from scientific journals*. Cambridge Scholars Publishing.
- Yılmaz, C. (2005). Kızılırmak Deltasında meydana gelen erozyonun coğrafi analizi. Türkiye Kuvaterner Sempozyumu, 2-5 Haziran 2005, İTÜ Avrasya Yer bilimleri Enstitüsü.
- Yüksek, Ö. (2008). Samsun'un batı kıyılarındaki erozyonların incelenmesi. Samsun Kent Sempozyumu Bildiriler Kitabı. TMMOB Samsun İl Koordinasyon Kurulu, Samsun.
- Zagórski, P., Jarosz, K., Superson, J. (2020). Integrated assessment of shoreline change along the Calypsostranda (Svalbard) from remote sensing, field survey and GIS. *Marine Geodesy*, 43 (5), 433-471. doi: 10.1080/01490419.2020.1715516
- Zeybek, H. İ., Bağcı, H. R., Bahadır, M. (2018). Kızılırmak Deltasında (Samsun) kıyı çizgisi değişimlerinin Bruun Kuralına göre değerlendirilmesi. *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 11 (58), 308-317.
- Zeybek, H. İ., Uzun, A., Yılmaz, C., Özdemir, S. (2011). Kızılırmak Deltası'nda kıyı çizgisi değişikliklerinin sonuçları. Samsun Sempozyumu Samsun.