

Açık Erişimli Kıyı Sayısal Yükseklik Modellerinin Kullanımı ile Deniz Seviyesi Yükselmesine Bağlı Taşkın Risklerinin İncelenmesi: Gediz Deltası Örneği

Investigation of Flood Risks Associated with Sea Level Rise Using Open-Access Coastal Digital Elevation Models: The Case of Gediz Delta

Osman Sami Kırtıloğlu^{1*}, Nevin Betül Avşar¹, Elif Akyel¹

¹İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 35620, İzmir/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Osman Sami Kırtıloğlu
osmansami.kirtiloglu@ikc.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1652686

Yayın süreci

Geliş tarihi: 06.03.2025
Kabul tarihi: 24.04.2025
Basım tarihi: 27.09.2025

Özet

Bu çalışma, Gediz Deltası'nda deniz seviyesi yükselmesinin etkilerini değerlendiren bir analiz sunmaktadır. Çalışma alanında kıyı yükseklik modeli olarak, farklı yöntemlerle küresel açık sayısal yükseklik modellerinin doğrulukları artırılarak oluşturulan Diluvium ve Delta modelleri kullanılmıştır. Su altında kalacak alanların belirlenmesi için 0,5 m, 1 m ve 2 m olmak üzere 3 farklı senaryo çalışılmıştır. En kötü senaryo sonuçlarına göre, delta alanının yaklaşık %88'inin su altında kalacağı tespit edilmiştir. Modellerin doğruluğu, HGM SYM5-L0 modeli kullanılarak değerlendirilmiştir. Delta ve Diluvium modelleri ile SYM5-L0 arasındaki farkların %89-%90 oranında ± 3 m aralığında kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç, her iki modelin de deniz seviyesi yükselmesi senaryolarında SYM5-L0 yerine kullanılabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, daha yüksek doğruluklu modellerin bu çalışmada neden kullanılmadığı ve kullanılmasının sonuçları nasıl etkileyeceği de tartışılmıştır. Diluvium ve Delta modelleri için karesel ortalama hata (RMSE) değerleri sırasıyla 2,45 m ve 3,46 m, ortalama mutlak hata (MAE) değerleri 1,67 m ve 1,99 m, standart sapma (SD) değerleri de 2,03 m ve 2,89 m olarak hesaplanmıştır. RMSE değerine göre modellerin yüksek doğruluk sağladığı, MAE ve SD değerlerine göre de model farklarının asgari düzeyde olduğu değerlendirilmiştir. Diluvium ve Delta modelleri, kıyı alanlarında deniz seviyesi artışı ve taşkın risklerinin değerlendirilmesinde, bu çalışma örneğinde, doğruluğu ± 3 m olan modeller yerine kullanıma uygun ve doğruluğu yüksek modeller olarak belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Deniz seviyesi yükselmesi, Gediz Deltası, Risk analizi, Açık veri

Abstract

This study evaluates the effects of sea level rise in the Gediz Delta using the Diluvium and Delta models, which enhance the accuracy of global open digital elevation models through different methods. These models served as coastal elevation models for the study area. Three scenarios (0.5 m, 1 m, and 2 m) were analyzed to identify areas at risk of inundation. Under the worst-case scenario, approximately 88% of the delta's total area is projected to be inundated. Model accuracy was assessed by comparing the results with the SYM5-L0 model from the General Directorate of Mapping. The differences between SYM5-L0 and the Diluvium and Delta models remained within ± 3 m for 89%–90% of the data, suggesting that these models can be used for sea level rise assessments instead of SYM5-L0. The study also discusses why higher-accuracy models were not employed and how their inclusion would influence the results. The root mean square error (RMSE) values for the Diluvium and Delta models were 2.45 m and 3.46 m, respectively. Their mean absolute error (MAE) values were 1.67 m and 1.99 m, while standard deviation (SD) values were 2.03 m and 2.89 m. These findings confirm that the models offer high accuracy, making them reliable for coastal flood risk assessments. Diluvium and Delta models have been identified as suitable and highly accurate models for assessing sea level rise and flood risks in coastal areas, as demonstrated in this study, rather than models with an accuracy of ± 3 m.

Keywords: Sea level rise, Gediz Delta, Risk analysis, Open data

1. Giriş

Küresel ısınma ve beraberindeki iklim değişikliği, deniz seviyesi değişimlerine yol açarak özellikle kıyı bölgelerinde ciddi çevresel ve ekonomik riskler yaratmaktadır. Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), deniz seviyesinin 2100 yılına kadar ortalama 0,5 ile 2,0 m arasında yükseleceğini öngörmektedir (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). Deniz suyu sıcaklıklarının artması da yoğun fırtına etkinliğini ve aşırı yağışları tetikleyerek kıyısız alanlarda sel ve taşkın risklerini artırmaktadır (Kaya, 2022). Bu durum, kıyı alanlarının kentsel planlanmasında ve bu alanlardaki mühendislik projelerinde deniz seviyesi yükselmesinin bir risk faktörü olarak dikkate alınmasını zorunlu hale getirmektedir. Yerleşim alanları, tarım arazileri ve ekosistemler üzerinde büyük etkilere sahip bu riskler, kıyı alanlarının yönetimi ve korunması için etkili planlama ve afet yönetimi süreçlerine duyulan ihtiyacı artırmaktadır. Delta bölgeleri, ekolojik çeşitliliği ve tarımsal önemi nedeniyle, iklim değişikliğinden en çok etkilenen alanlar arasında yer almaktadır (Bozduman, 2019). Yapılan çalışmalar, Türkiye'nin kıyı bölgelerinin özellikle delta alanları gibi hassas bölgelerde deniz seviyesi değişimlerine karşı daha kırılgan olduğunu ortaya koymaktadır (Demirkesen vd., 2008; Simav & Şeker, 2013). Deniz seviyesi yükselmesi, delta alanlarında yer altı su kaynaklarının tuzlanması, ekosistem bozulması, verimli tarım alanlarının kaybı ve kıyısız erozyon gibi olumsuz sonuçlara yol açmaktadır. Bu durum, kıyı yönetim politikalarının gözden geçirilmesini ve yerel yönetimlerin somut adımlar atmasını gerektirmektedir (Gazioğlu vd., 2010; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).

Diluvium DEM ve Delta DTM, deniz seviyesi değişimlerinin etkilerini modellemek için kullanılan sayısal yükseklik modelleri (SYM) arasında yer almaktadır. Diluvium DEM, özellikle kıyı bölgelerinin ve delta alanlarının topografyasını hassas bir şekilde temsil etmek amacıyla geliştirilmiş bir modeldir (Dusseau vd., 2023). Bu model, yüksek çözünürlükte veri sunarak, alçak bölgelerde kıyı erozyonunun ve deniz seviyesindeki değişikliklerin etkilerini simüle etmek için kullanılmakta ve global düzeydeki modellerden farklı olarak, yerel ölçümlerle desteklenerek daha hassas veri sağlamaktadır. Delta DTM ise, delta ekosistemlerinin topografik özelliklerini ve kıyı hatlarını daha doğru bir şekilde modellemek için kullanılan başka bir sayısal arazi modelidir (Pronk vd., 2024). Bu model, delta alanlarındaki su baskınları ve deniz seviyesindeki değişimlerin etkilerini tespit etme açısından önemli bir araçtır. Özellikle deniz seviyesi değişimlerinin delta ekosistemleri üzerindeki etkilerini analiz etmek için kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra, 30 cm çözünürlüklü stereo hava fotoğraflarından otomatik eşlemeyle üretilen SYM5-L0 modeli, Türkiye'deki yerel topografyayı doğru bir şekilde temsil etmek için geliştirilmiş önemli bir sayısal yüzey modelidir. Harita Genel Müdürlüğü (HGM) tarafından sağlanan bu model ± 3 m düşey doğruluğa sahip olup, kıyı bölgelerindeki deniz seviyesi değişimlerinin etkilerini simüle etmek için kritik bir referans noktası olarak değerlendirilebilir (Çam vd., 2013; Ozsahin vd., 2023, Özdemir & Akbaş, 2023). Referans noktası olarak kullanılan bir diğer veri seti ise Coordination of Information on the Environment (CORINE)'dir (Arslan & Örucü, 2019; Bayar & Karabacak, 2017; Gülçin, 2018). Arazi kullanımı ve toprak örtüsü haritalarının yapımı için oluşturulmuş geniş kapsamlı bir veri tabanı olan CORINE ile risk altındaki arazi örtüsü sınıfları belirlenebilmekte ve arazi örtüsü ile ilgili tüm analizlerde bu veri seti altlık olarak kullanılabilir (Arslan & Örucü, 2019). Deniz seviyesi değişimlerinin izlenmesi ve analizi amacıyla ülkemizde kurulan Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES), deniz seviyesindeki değişimlerin hem mekânsal hem de zamansal eğilimlerini belirlemeye yönelik güvenilir veriler sağlamaktadır (Harita Genel Müdürlüğü, 2024).

IPCC iklim değişikliği, etkileri ve gelecekteki potansiyel riskleri hakkında düzenli bilimsel değerlendirmeler yapmak için oluşturulmuş, Birleşmiş Milletler bünyesinde çalışan bir kuruluştur. IPCC'nin, 2021'de yayınlanan Altıncı Değerlendirme Raporu (AR6), iklim değişikliği için beş olası gelecek senaryosu sunmaktadır. Her senaryo, farklı sera gazı emisyon seviyeleri ve bunlara karşılık gelen sosyoekonomik bir çerçeve ile (Shared Socioeconomic Pathway: SSP) tanımlanmaktadır (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021). IPCC senaryoları en iyimserden en kötüsüne şu şekilde sıralanabilir: SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 ve SSP5-8.5. İlgili senaryolar kapsamında, gelecekteki deniz seviyesi yükselmesine ilişkin projeksiyonlar da yapılmaktadır (Fox-Kemper vd., 2021). SSP senaryolarına göre, en düşük emisyon öngörülleri olan SSP1-1.9 ve SSP1-2.6 senaryolarında, küresel ısınmanın 1,5 °C ile sınırlandırılması hedeflenmektedir ve bu senaryolar altında 2100 yılına kadar deniz seviyesindeki yükselmenin sınırlı kalacağı, maksimum 0,5 m olacağı öngörülmektedir. Orta düzey emisyon senaryosu olan SSP2-4.5, daha ılımlı bir artış öngörmekte ve 2100 yılında deniz seviyesinin 0,5 ile 1 m arasında yükseleceğini tahmin etmektedir. SSP3-7.0 senaryosu, daha yüksek emisyon seviyeleri ve sınırlı iklim politikaları öngören bir senaryo olup, 2100 yılında deniz seviyesinin 1,5 m'yi aşabileceğini göstermektedir. En olumsuz senaryolar olan SSP5-8.5 ve SSP5-8.5 Düşük Güvenilirlik projeksiyonlarına göre ise, sera gazı emisyonlarının hızla arttığı durumda deniz seviyesindeki yükselmenin 2 m'ye kadar ulaşabileceği ve bu artışın özellikle 2080-2100 yılları arasında gerçekleşebileceği belirtilmektedir.

Türkiye'nin Batı Anadolu kıyısında yer alan Gediz Deltası, zengin ekosistemi ve insan faaliyetleriyle şekillenen yapısı ile, deniz seviyesi yükselmesinin etkilerinin modellenmesi ve analiz edilmesi için ideal bir çalışma alanı sunmaktadır (Yılmaz & Erdem, 2011). Bu kapsamda, bu çalışmada deniz seviyesi yükselmesi senaryolarına dayalı olarak Gediz Deltası kıyılarında meydana gelebilecek değişimler, Diluvium ve Delta sayısal yükseklik modelleri kullanılarak incelenmiştir.

Bölgenin, bu riske karşı hassasiyetinin belirlenebilmesi amacıyla modellerin doğrulukları karşılaştırmalı testler ile değerlendirilmiştir. Karşılaştırma yapılan modeller yükseklik modeli, arazi modeli ve yüzey modeli gibi farklı kapsamlara sahip olduğundan, doğruluk araştırması yapılacak noktalar bina ve bitki örtüsü etkilerinden arındırılmış alanlar üzerinde seçilmiştir.

Çalışmada kullanılan yükseklik modellerinin ve deniz seviyesi projeksiyonlarının ayrıntılı açıklamaları, çalışma alanının tanıtımı Materyal ve Metot bölümünde yer almaktadır. Seçilen yükseklik modelleri ve doğruluk araştırmasında kullanılan istatistiksel yöntemler, deniz seviyesi yükselmesi senaryolarında kullanılan değerler ve seçim aşamaları, belirlenen deniz seviyelerine göre Gediz Deltasının nasıl etkileneceği ayrıntılı analizlerle Veri Analizi bölümünde açıklanmaktadır. Ayrıca yükseklik modellerinin doğruluklarının bu gibi çalışmalar için yeterliği de Bulgular ve Tartışma bölümünde değerlendirilmiştir. Gediz Deltası'nda deniz seviyesi yükselmesi senaryolarına dayalı olarak yapılan bu modelleme çalışması, bölgedeki kıyı değişimlerini anlamak adına önemli bulgular sunacaktır.

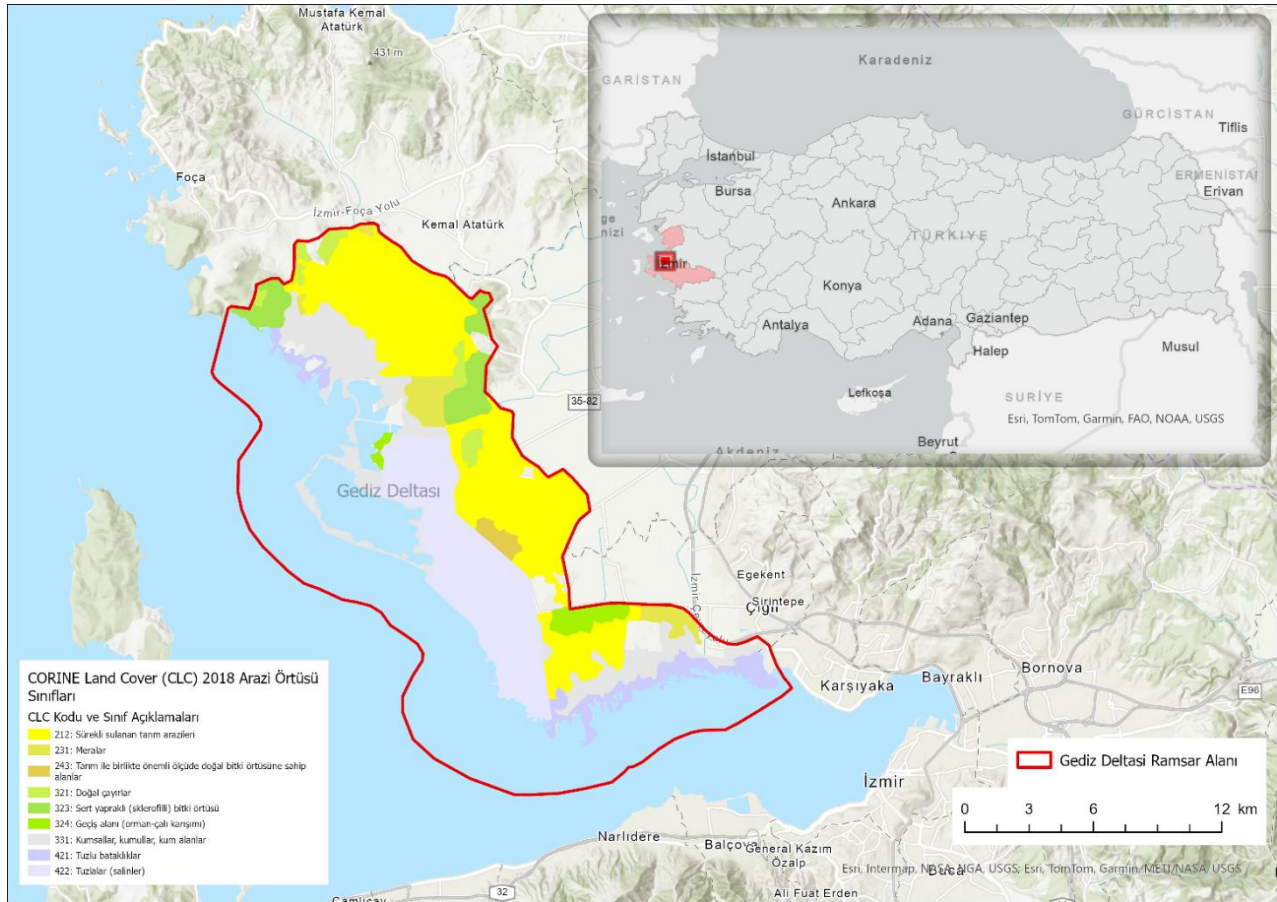
2. Materyal ve Metot

Deniz seviyesi yükselmesi senaryoları üzerine yapılan çalışmalar, doğru ve güvenilir yükseklik modellerine dayanmakta olup, bu modellerin doğruluğu ve çözünürlüğü, taşkın modellemeleri ve kıyı alanlarındaki değişimlerin doğru bir şekilde simülasyonu için kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, deniz seviyesindeki değişimlerin modellenmesi için kabul edilebilir doğruluk sınırları, kullanılan veri setleri, analiz türü ve hedeflenen uygulamaya göre değişkenlik gösterebilir. Ancak genel bir kılavuz olarak, deniz seviyesi değişimleri sonucu oluşabilecek su baskını modellenmesinde kullanılan yükseklik modellerinin düşey doğruluğu genellikle ± 1 ile ± 3 m arasında kabul edilmektedir. Bu doğruluk seviyesi, suyun yayılma yönü ve seviyesinin doğru bir şekilde simüle edilmesi için yeterli kabul edilir. Daha hassas deniz seviyesi değişim modellerinin yönetimi ve yüksek riskli bölgelerde ise, ± 1 m veya daha yüksek doğruluk gereksinimleri söz konusu olabilir. Mekânsal çözünürlük de analizlerin doğruluğunu doğrudan etkileyen bir parametredir. Su akışının ve yayılmasının doğru şekilde modellenmesi için, çözünürlük seviyesinin yeterli olması gerekmektedir. Su seviyesi yükselmesi analizi için genellikle 10 m çözünürlük yeterli kabul edilse de yerel modellemeler veya küçük alanlarda daha yüksek çözünürlük (örneğin 1 m veya daha küçük) tercih edilebilir. Bu, özellikle yerel su seviyesi artışı risklerinin değerlendirildiği analizlerde büyük bir öneme sahiptir.

Gediz Deltası'ndaki kıyı alanlarındaki değişimlerin incelendiği bu çalışma, deniz seviyesi yükselmesi senaryolarına dayalı olarak çeşitli sayısal yükseklik modellerinin doğruluğunu analiz etmeyi hedeflemektedir. Bu doğrultuda, kullanılan veri setleri arasında Diluvium DEM, Delta DTM, SYM5-L0 modeli yer almaktadır. Gediz Deltası'nda meydana gelebilecek kıyı değişimlerinin güvenilir bir şekilde simülasyonu için bu modellerin doğruluğunun titizlikle incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla SYM5-L0 modeline ek olarak CORINE 2018 veri tabanı kullanılmıştır. CORINE 2018 yardımıyla bina ve bitki örtüsü bulunmayan bölgeler maskeleme işlemi ile belirlenmiş ve bu alanlarda rastgele noktalar oluşturulmuştur. Rastgele seçilen bu noktalarda SYM ve DTM yükseklik verileri karşılaştırılarak doğruluk analizleri gerçekleştirilmiştir. 100 m mekânsal çözünürlüğe sahip olan CORINE 2018 verisi, çevresel detayların ayrıştırılmasında temel bir veri kaynağı olarak kullanılmıştır.

2.1 Çalışma Alanı

Bu çalışmada, İzmir Körfezi'nin kuzeydoğusunda yer alan ve yaklaşık 400 km²'lik alanı ile Türkiye'nin en büyük kıyı deltalarından biri olan Gediz Deltası (Doğa Derneği, 2023) çalışma alanı olarak seçilmiştir (Şekil 1). İzmir ili sınırlarında kalan delta alanı Karşıyaka, Çiğli, Menemen ve Foça ilçeleriyle çevrilidir (Demirlenk, 2022). Gediz Deltası; tatlı, tuzlu ve acı su ekosistemlerinin iç içe geçtiği, Homa, Çilazmak ve Kırdeniz Dalyanları ile Çamaltı Tuzlası gibi mikro-habitatları barındıran karmaşık bir sulak alan sistemidir. Ramsar Sözleşmesi kapsamında koruma altındaki bu alan, başta flamingolar olmak üzere 300'ü aşkın kuş türü için kritik öneme sahiptir (Uluturhan Suzer vd., 2015; Tırıl, 2005). Şekil 1'de Gediz Deltası'nın, CORINE 2018 arazi örtüsü verileri ve Ramsar sınırları kullanılarak oluşturulmuş doğal ve tarımsal sınıfları da gösterilmektedir. Son otuz yılda yürütülen CBS tabanlı analizlerde, delta kıyı şeridinde erozyon ve kara yönlü çekilmeler gözlemlenmiştir (Tağıl vd., 2023). Aynı süreçte kentleşme ve sanayi alanlarının artışı, sulak alanlar ve tarım arazilerinin daralması ile eşzamanlıdır (Alevkayalı & Tağıl, 2018).

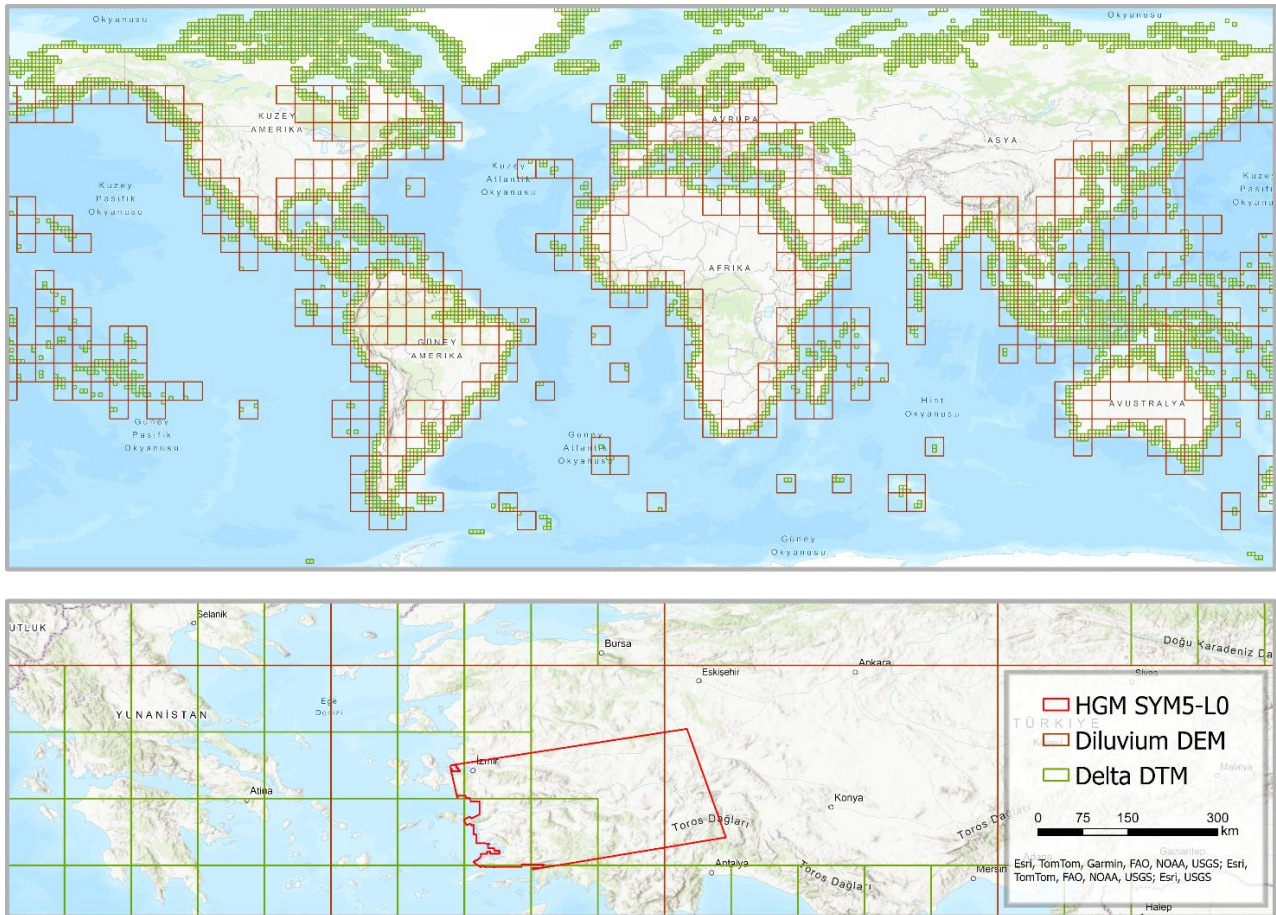


Şekil 1. Çalışma alanı genel görünümü, Gediz Deltası arazi örtüsü (CORINE18) ve Ramsar sınırı (Doğa Derneği, 2023)

Jeoarkeolojik bulgular, Holosen dönemine ait deniz seviyesi değişimlerinin deltaya yakın alanlarda insan yerleşimlerini etkilediğini ortaya koymuştur (Öner & Vardar, 2018). Sediman analizleri de, özellikle dalyan bölgelerinde antropojenik ağır metal kirliliğine işaret etmektedir (Uluturhan Suzer vd., 2015). Tüm bu veriler ışığında Gediz Deltası, çevresel izleme ve sürdürülebilir planlama açısından önemli bir model alan konumundadır.

2.2. Veri Setleri

Bu çalışmada kullanılan modellerin mekânsal çözünürlükleri ve düşey doğrulukları, doğruluk analizinin temelini oluşturan unsurlardır. SYM5-L0 modeli, en yüksek çözünürlüğe sahip model olup ± 3 m düşey doğruluğu ve 5 m mekânsal çözünürlüğü vardır (Harita Genel Müdürlüğü, 2025). HGM tarafından Türkiye'nin topografik detaylarını yüksek çözünürlükle temsil etmek için geliştirilmiş bir sayısal yüzey modelidir. Bu veri seti, 30 cm çözünürlüklü stereo hava fotoğraflarından otomatik eşleme yöntemiyle elde edilmiştir. Arazi üzerindeki doğal ve insan yapımı unsurları içeren model, su yüzeyleri ve kaba hatalar düzeltilmemiş şekilde sunulmaktadır. Modelin düşey doğruluğu, GeoTIFF formatında 32-bit floating veri türüyle sağlanmaktadır. Bu özellikler, doğal afet risklerinin modellenmesi ve analizleri, arazi kullanımı planlaması ve şehircilik projelerinde kullanımı mümkün kılmaktadır. Veri seti, güncel hava fotoğrafı çekilen tüm bölgeler için geçerli olup, yalnızca kamu kurumları, belediyeler ve üniversiteler ile ücretsiz olarak paylaşılmaktadır. Özel sektör veya bireyler için satışı bulunmamaktadır. Bu model, Türkiye karalarının tamamını kapsayan, araştırmalar ve akademik çalışmalarda kullanılmak üzere erişilebilir en yüksek doğruluğa sahip model olması açısından tercih edilmiştir. Diğer yandan, Delta DTM ve Diluvium DEM modellerinin mekânsal çözünürlükleri sırasıyla 10 m ve 20 m olup, bu modellerin çözünürlüğü SYM5-L0 ile kıyaslandığında daha düşüktür. Bu fark, doğruluk analizinin doğruluğunu etkileyebilecek bir faktördür. Bu nedenle, SYM5-L0 modelinin yüksek çözünürlüğü ile Delta DTM ve Diluvium DEM modellerinin çözünürlük farkları arasındaki etki dikkatle göz önünde bulundurulmuştur. Kullanılan veri seti çerçeveleri Şekil 2 ile verilmiştir.



Şekil 2. Global kıyı yükseklik modelleri kapsamı ve çalışmada kullanılan HGM SYM5-L0 veri seti çerçevesi (altta)

Diluvium DEM, kıyı bölgeleri için özel olarak geliştirilmiş, küresel bir SYM'dir. Bu model, Copernicus DEM'deki dikey hataları düzeltmek için LightGBM algoritması kullanılarak optimize edilmiştir. Mekânsal çözünürlüğü 30 m olan Diluvium DEM, kıyı bölgelerinde, özellikle 2 m altındaki yüksekliklerde 1,13 m RMSE değeri ile dikkat çekmektedir. Bu doğruluk, deniz seviyesinin yükselmesi ve kıyı taşkın modellemeleri gibi uygulamalarda mevcut DEM'lere kıyasla iki kat daha yüksek hassasiyet sağlamaktadır. Düşey doğruluğu, IPCC'nin SSP2-4.5 ve SSP5-8.5 senaryolarında öngörülen deniz seviyesi yükselmelerine ilişkin harita yapımı için uygundur. Diluvium DEM hem küresel hem yerel ölçekte afet risk yönetimi ve kıyı planlaması için yenilikçi bir araçtır (Dusseau vd., 2023).

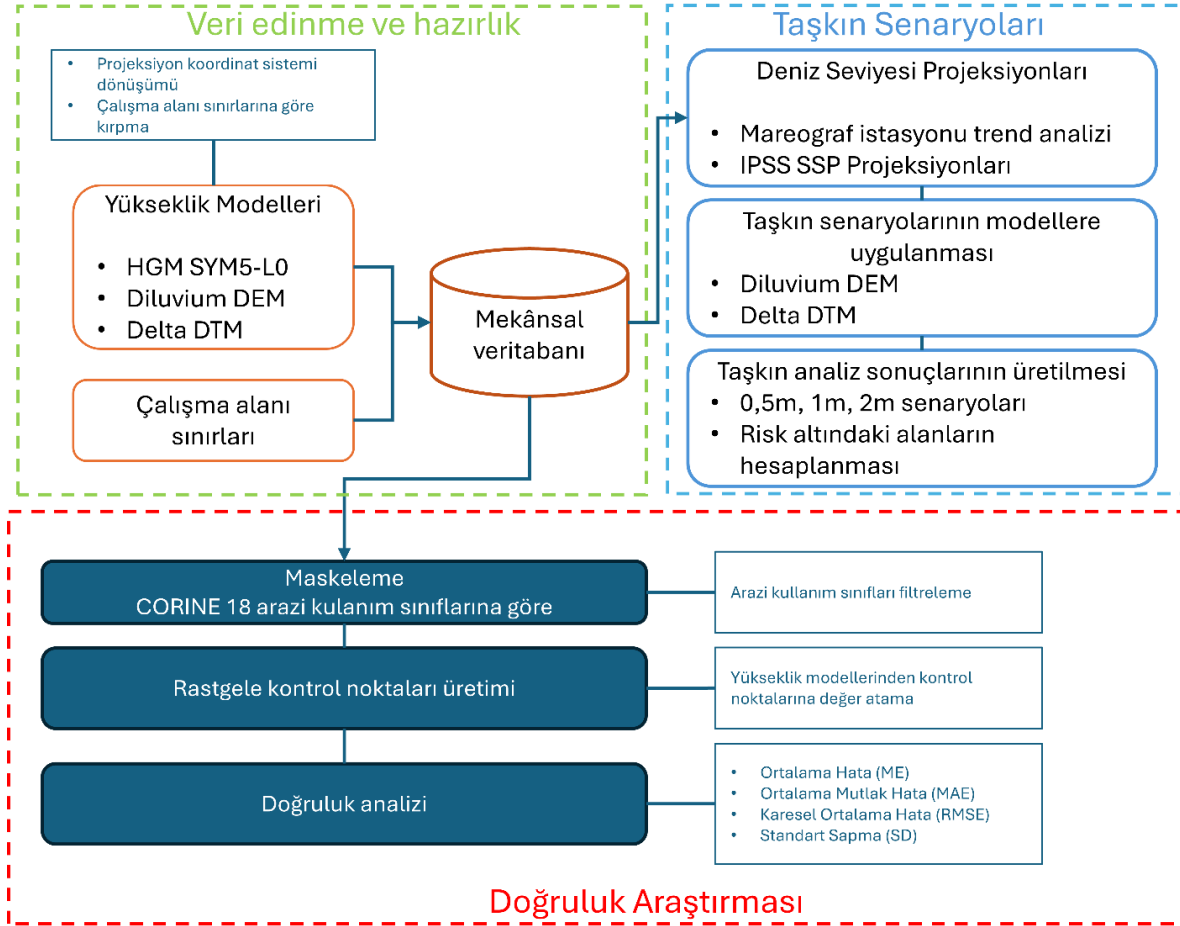
Delta DTM, kıyı bölgeleri için tasarlanmış yüksek doğruluklu bir sayısal arazi modeli (SAM) olup, mekânsal çözünürlüğü 30 m olarak sunulmaktadır. Model, Copernicus DEM'in yanı sıra ICESat-2 ve GEDI lazer verilerini birleştirilerek oluşturulmuş ve Copernicus DEM'deki yüzey hataları (örneğin ağaç ve bina etkileri) düzeltilmiştir. Delta DTM'nin dikey doğruluğu 0,45 m MAE olarak hesaplanmıştır ve doğruluk oranı küresel kıyı bölgelerinde %91'i aşmaktadır. Bu yüksek doğruluk, kıyı sel risklerinin değerlendirilmesi, deniz seviyesindeki yükselmelerin etkilerinin analizi ve kıyı yönetim planlarının geliştirilmesi gibi alanlarda geniş çapta kullanılabilir. Delta DTM, açık erişimli bir model olmasıyla kullanıcıların bilimsel çalışmalarında ve pratik uygulamalarında şeffaf ve kolay erişilebilir bir kaynak sağlamaktadır (Pronk vd., 2024).

CORINE Land Cover 2018 (CLC2018), Avrupa'nın arazi örtüsü ve kullanımının farklı semantik düzeylerde temsil edildiği, uydu görüntülerine dayalı bir veri setidir. Copernicus Land Monitoring Service tarafından geliştirilen bu ürün, Avrupa Çevre Ajansı (EEA) koordinasyonunda sunulmaktadır. 100 m mekânsal çözünürlük ile üretilen CLC2018, arazi örtüsü sınıflandırmasını standartlaştırılmış bir sistemle 44 tematik sınıfta yapmaktadır. Veri setinin tematik doğruluğu %85'in üzerindedir ve bu özellik, çevresel izleme, şehir planlama, tarımsal değerlendirme ve iklim değişikliği analizi gibi geniş bir uygulama alanında kullanımını mümkün kılar. Model, özellikle arazi örtüsü analizleri için geliştirilmiş olup, minimum harita yapım birimi (MMU), alansal nesneler için 25 hektar ve çizgisel nesneler için 100 m'dir. Sentinel-2 ve Landsat-8 gibi modern uydu sistemleriyle desteklenen veri seti, Avrupa'nın 2017-2018 yıllarındaki arazi kullanımını yansıtan en güncel sürümünü sunmaktadır. Ayrıca, her altı yılda bir yenilenen CLC, arazi değişimlerini analiz etmek için 5 hektar minimum birim çözünürlükle değişim katmanları da sağlar.

CLC2018, çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmak, şehirleşme etkilerini anlamak ve ekosistem yönetimini geliştirmek için önemli bir referans kaynağıdır. Copernicus Çevre Programı altında açık ve ücretsiz olarak sunulmaktadır (Gülçin, 2018).

2.3 Veri Analizi

Çalışmada kullanılan analizlere ait akış diyagramı şeklinde Şekil 3'te sunulmuştur.



Şekil 3. Çalışmada yürütülen süreçlerin akış diyagramı

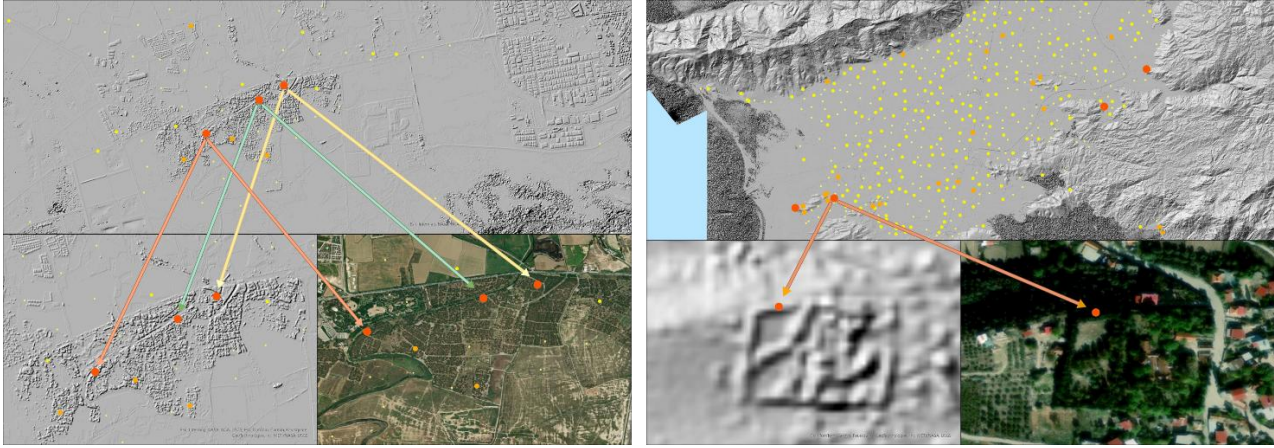
Model doğruluğu testlerinde, veri setlerinin doğru şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla yalnızca çıplak arazi üzerinde yapılan testlere odaklanılmıştır. HGM SYM5-L0 yüzey modelinde binalar ve bitki örtüsü gibi çevresel unsurlar, doğruluk testlerinin sonuçlarını etkileyebileceğinden, bu unsurların etkisi minimize edilmeye çalışılmıştır. Maskeleme işlemi ile sadece doğal arazi özelliklerine odaklanılmış ve bazı sınıflar veri setinden çıkarılmıştır. Bu işlem, CORINE 2018 veri tabanının sağladığı sınıflandırmalara dayanarak gerçekleştirilmiştir. CORINE 2018 veri seti 100 m mekânsal çözünürlüğe sahip olup, bazı küçük nesneler ve nesne detaylarını sınırlasa da geniş alanlardaki arazi örtüsü sınıflarını belirlemek için yeterli olmuştur.

Maskeleme işlemi, uydu görüntüleri ve DEM verileri gibi mekânsal veri analizlerinde belirli bölgelerin seçilmesi veya dışlanması amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Gediz Deltası'nda deniz seviyesi yükselmesinin kıyı alanlarına etkilerini doğru şekilde analiz edebilmek için bina ve bitki örtüsü etkilerinden arındırılmış alanlar seçilmiştir.

Bu alanlarda rastgele noktalar oluşturulmuş ve SYM5-L0 modeli ile Diluvium ve Delta modelleri yükseklik değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, yükseklik modellerinin (DTM) ve yüzey modellerinin (SYM) gerçek arazi koşullarını ne kadar doğru yansıttığını test etmek için önemlidir. Maskeleme işlemi, doğru analiz yapılabilecek alanlara odaklanmayı sağlayarak, çevresel etkilerin hata kaynaklarını minimize etmiştir. Böylelikle, Gediz Deltası'nda deniz seviyesi yükselmesinin kıyı alanlarına etkileri daha güvenilir ve doğru bir şekilde değerlendirilebilmiştir.

Çalışma alanında oluşturulan rastgele noktalara karşılık gelen yükseklik değerleri SYM5-L0, Diluvium ve Delta modellerinde belirlenmiştir. Ardından, yükseklik farkları değerlendirilmiş ve farkların ± 3 m sınırı içerisinde kalan oranı belirlenmiştir.

Yükseklik farklarının karesel ortalama hatası (RMSE) ve standart sapma değerleri hesaplanarak modellerin genel doğruluğu analiz edilmiştir. Rastgele seçilen noktalardaki yükseklik farkları görselleştirilmiş (Şekil 4), böylece model farklarının mekânsal dağılımı ayrıntılı şekilde incelenmiştir. Bu yöntem, modellenen bölgedeki yükseklik verilerinin güvenilirliğini değerlendirirken çıplak arazi üzerindeki yükseklik farklarının daha gerçekçi bir şekilde analiz edilmesine olanak tanımıştır.



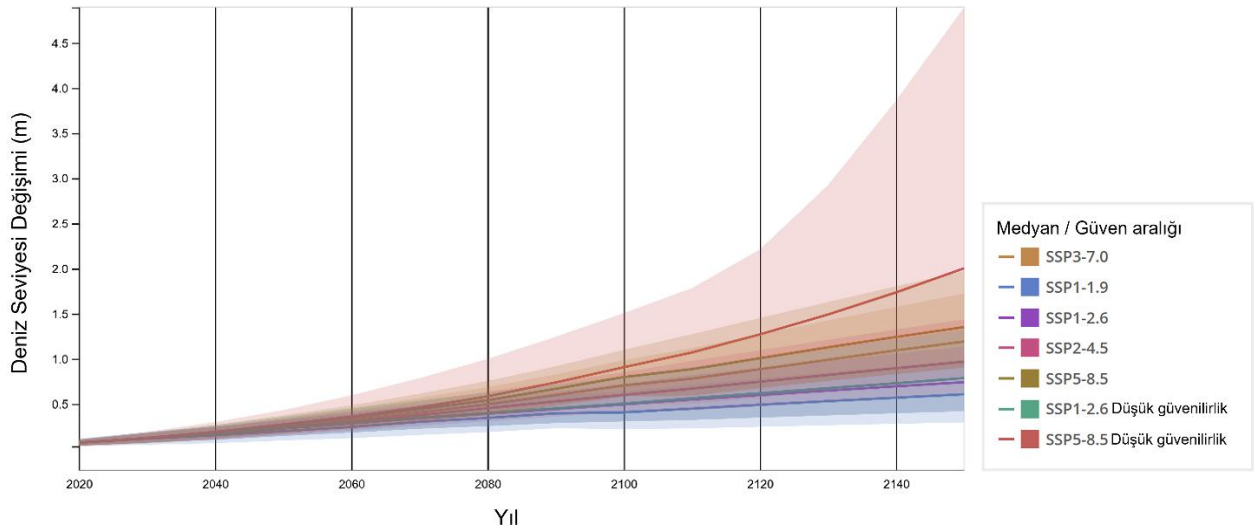
Şekil 4. Rastgele seçilen noktalardaki yükseklik farklarının yüksek olduğu alanlar Delta DTM (sol), Diluvium DEM (sağ) (Modellerde aşırı yükseklik farklarının yüzey modelindeki nesneler olduğu görülmektedir)

Bununla birlikte, CORINE 2018 veri setinin 100 m çözünürlüğü bazı ayrıntıların kaçırılmasına neden olabileceği de bu yaklaşım doğruluk analizlerinde bina ve bitki örtüsü etkilerini minimize etmek açısından yeterli bir çözüm sunmuştur. SYM5-L0 modelinin yüzey modeli olması, maskeleme ve rastgele nokta seçimlerini daha da önemli hale getirmiştir. Bina ve bitki örtüsünden arındırılmış bir arazi modeli olsaydı, bu süreç üç modelin çözünürlüğü eşitlenerek doğrudan fark alınmasıyla sonuçlandırılabilirdi. Ancak mevcut koşullarda, diğer modellerin kıyı bölgelerinde sınırlı kalması, fark analizi yapılacak bölgeyi de sınırlandırmıştır. Delta modelinin kıyı çizgisinden itibaren 10 m, Diluvium modelinin ise 20 m yüksekliğe kadar veri sunması, analizlerin kapsamını daraltan faktörlerden biri olmuştur. Bu hususlar, çalışma boyunca doğruluk analizlerinde dikkatle göz önünde bulundurulmuştur. Sonuç olarak, rastgele nokta seçimi ve bu noktalar üzerindeki analizler, farklı yükseklik modellerinin deniz seviyesi yükselmesine karşı duyarlılığını değerlendirmek ve modellerin genel doğruluğunu yorumlamak için kritik bir rol oynamıştır.

Deniz seviyesi projeksiyonlarına ilişkin veri analizleri kapsamında ise TUDES verileri ve IPCC senaryolarından yararlanılmıştır. Ülkemizde deniz seviyesi gözlemleri, TUDES kapsamında HGM tarafından yapılmaktadır. TUDES, Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti kıyılarında kurulmuş 20 adet radar sensörlü mareograf istasyonundan oluşur. Bu istasyonlarda gözlenen deniz seviyesi değerleri, 15'er dakikalık veriler şeklinde yayınlanır. Veri kalite kontrolü, yönetimi, analizi ve dağılımı Ankara'daki veri merkezi tarafından sağlanır. Her bir istasyonda, deniz seviyesini etkileyen meteorolojik parametreler (hava basıncı, hava sıcaklığı, nem ve rüzgâr) de ayrıca ölçülür. Mareograf istasyonları kuruldukları karaya göre bağıl deniz seviyesini ölçtüğü için, karanın düşey yöndeki kara hareketinin de belirlenmesi gerekir. Bu nedenle, istasyonlara GNSS alıcıları da entegre edilmiştir (Harita Genel Müdürlüğü, 2024).

Çalışmada, Ege Denizi kıyısında bulunan TUDES istasyonlarından Menteş (MNTS) mareograf istasyonunun Nisan 1999 – Aralık 2023 dönemine ait deniz seviyesi verileri kullanılmıştır. Aylık ortalamalar alınarak oluşturulan aylık deniz seviyesi zaman serilerinden yıllık ve yarı-yıllık mevsimsel sinyaller kaldırılarak doğrusal bir trend elde edilmiştir. Menteş mareograf istasyonunda bağıl deniz seviyesi trendi $3,7 \pm 0,5$ mm/yıl olarak bulunmuştur. Hesaplanan trendin anlamlılığı Mann-Kendall analizi ile test edilmiş, Sen's slope testi ile de yükselme trendi doğrulanmıştır. Yıldız vd. (2013), Mart 1993 – Aralık 2019 döneminde aynı bölgede Küresel Konumlama Sistemi (GPS) ölçüleri ile belirlenen $-1,2 \pm 0,5$ mm/yıl büyüklüğünde lokal bir çökme hareketinden söz etmektedir. İlgili dönemde, deniz seviyesi için ise $3,8 \pm 0,9$ mm/yıllık yükselme trendi belirlenmiştir.

Diğer yandan, deniz seviyesi değişimlerinin etkilerini daha iyi anlamak ve bu etkileri kıyı planlamasında dikkate almak için IPCC Altıncı Değerlendirme Raporu (AR6) iklim değişikliği senaryoları (SSP) kapsamında oluşturulmuş deniz seviyesi projeksiyonlarına da bu çalışmada yer verilmiştir. Şekil 5'te, farklı senaryolar altında 2150 yılına kadar global deniz seviyesinin nasıl değişeceği görülmektedir.



Şekil 5. 2020 yılına göre global ortalama deniz seviyesi değişimi (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021)

Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi Deniz Seviyesi Projeksiyon Aracı (NASA Sea Level Projection Tool) ile IPCC AR6'daki deniz seviyesi projeksiyonlarının görselleştirilmesi ve verilerin indirilmesi mümkün olmuştur. Kullanıcılar, bu araç ile 2150 yılına kadar hem küresel hem de bölgesel deniz seviyesi projeksiyonlarını ve bu projeksiyonların senaryolara bağlı olarak nasıl farklılık gösterdiğini görüntüleyebilmektedir. IPCC AR56 Sea Level Projection Tool ile ilgili ayrıntılı bilgiye https://sealevel.nasa.gov/data_tools/17 web sayfasından ulaşılabilir.

Bu çalışmada, Menteş mareograf istasyonundaki deniz seviyesi projeksiyonları her bir IPCC senaryosuna göre dikkate alınmıştır. 5 projeksiyon orta güvenilirlikteki senaryolara dayanırken, 2 tane de -yüksek etkili dünya buz örtüsündeki değişim süreçlerinin potansiyel etkilerini gösteren- düşük güvenilirlikli senaryo kullanılmıştır. Projeksiyon değerleri, 1995-2014 ortalamasına göre bağlı olarak belirlenmiştir (Tablo 2).

Modellerin doğruluğunu ölçmek için dört temel istatistiksel metrik kullanılmıştır. Bunlar, ME (Mean Error - Ortalama Hata), MAE (Mean Absolute Error - Ortalama Mutlak Hata), RMSE (Root Mean Square Error – Karesel Ortalama Hata) ve SD (Standard Deviation - Standart Sapma) metrikleridir.

Ortalama Hata (ME - Mean Error): ME, her bir modelin tahmin ettiği yükseklik ile gerçek yükseklik arasındaki farkların aritmetik ortalamasıdır. Eşitlik (1) ile verilen formül kullanılarak hesaplanan ME, modelin genelde pozitif ya da negatif yönde sistematik bir hata yapıp yapmadığını belirlemek için kullanılmaktadır.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i^{model} - h_i^{SYM5-L0}) \quad (1)$$

burada h_i^{model} Diluvium DEM veya Delta DTM verisindeki i . noktanın yüksekliği, $h_i^{SYM5-L0}$ SYM5-L0 verisindeki i . noktanın yüksekliği ve n toplam nokta sayısını ifade etmektedir. ME değeri pozitif ise model genelde SYM5-L0'dan daha yüksek değerler üretmektedir; negatif ise daha düşük değerler üretmektedir. ME değeri sıfıra yakınsa, modelin sistematik hatasının düşük olduğu kabul edilmektedir.

Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error - MAE): Ortalama mutlak hata, yükseklik farklarının mutlak değerlerinin ortalamasıdır. Eşitlik (2) yardımıyla hesaplanan bu metrik, pozitif veya negatif yönde sapmalara bakmaksızın modelin genel hata büyüklüğünü ölçmektedir.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |h_i^{model} - h_i^{SYM5-L0}| \quad (2)$$

Ortalama mutlak hata farkların mutlak değerlerini kullandığından, her nokta için pozitif veya negatif sapmalar birbirini nötrlemez ve genel hatanın büyüklüğü doğrudan gösterilmiş olur.

Karesel Ortalama Hata (Root Mean Square Error - RMSE): Bu hata, farkların karelerinin ortalamasının karekökünü olarak hesaplanır. Eşitlik (3)'te yer alan formülle hesaplanan RMSE, büyük sapmaların daha fazla ağırlık kazanmasını sağlar ve daha büyük hataların analiz edilmesinde faydalıdır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i^{model} - h_i^{SYM5-L0})^2} \quad (3)$$

RMSE, MAE'ye kıyasla büyük hataların etkisini daha fazla gösterir; bu nedenle büyük hata değerleri analiz edilmek istendiğinde özellikle tercih edilmektedir.

Standart Sapma (Standard Deviation - SD): SD, tahmin hatalarının yayılımını ve modelin doğruluğundaki tutarlılığı ölçmek için kullanılır. Eşitlik (4) yardımıyla hesaplanan SD, hataların standart sapması, modelin farklı alanlardaki performans değişimlerini değerlendirmek için önemlidir.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ((h_i^{model} - h_i^{SYM5-L0}) - ME)^2} \quad (4)$$

SYM5-L0'a göre farklılıkların dağılım genişliğini ölçmektedir. Bu metrikler kullanılarak noktalarda gerçekleştirilen istatistiksel analizler sonucunda doğruluk sınırları analizi gerçekleştirilmiştir.

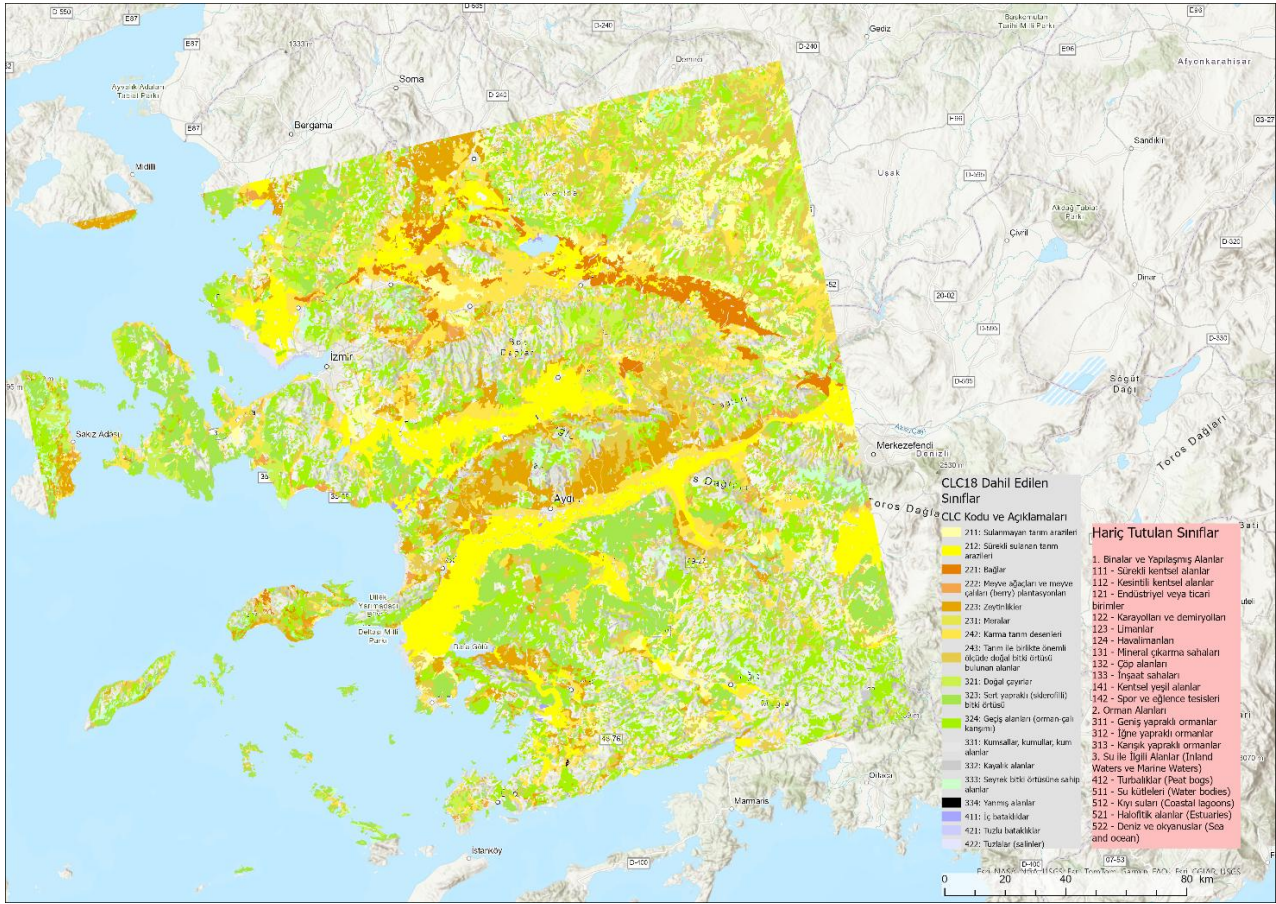
Delta ve Diluvium modelleri, SYM5-L0 ile hesaplanan yükseklik değerleri arasındaki farklar üzerinden değerlendirilmiş ve farkların SYM5-L0 ± 3 m doğruluk sınırını geçip geçmediği Eşitlik (5)'te yer alan formül kullanılarak kontrol edilmiştir.

$$|h_i^{model} - h_i^{SYM5-L0}| \leq 3 \text{ m} \quad (5)$$

Farkların 3 m'nin altında kalması durumunda, modellerin doğruluğu yeterli kabul edilmiş ve bu şartı sağlayan nokta sayısının toplam nokta sayısına oranlamasıyla modellerin doğruluk oranı belirlenmiştir.

3. Bulgular ve Tartışma

Çalışmanın bulgularında maskeleme işlemi, rastgele nokta üretimi ve doğruluk analizleri gibi farklı aşamalar, her bir aşamanın rolü ve katkıları açısından kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Bu analizler, model performanslarını karşılaştırarak, her bir modelin deniz seviyesi yükselmesi senaryolarına karşı duyarlılığını ve doğruluk seviyelerini değerlendirmek için kritik bir temel sağlamaktadır. Bulgular kısmında her bir analiz aşamasına dair elde edilen sonuçlar ve bu sonuçların çalışmanın genel bulgularına katkıları sırasıyla sunulmuştur. Maskeleme işlemi: Bina ve bitki örtüsünden etkilenmeyen alanların seçilebilmesi için yapılmıştır. CLC2018 veri seti, bina ve bitki örtüsü bulunan bölgelerin belirlenmesi ve çalışma kapsamından çıkarılmasında temel veri kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu işlem, özellikle SYM5-L0 modelinin bir yüzey modeli olması nedeniyle önemli bir adım olarak değerlendirilmiştir. Maskeleme işlemi ile bazı sınıflar veri setinden çıkarılmıştır. CLC2018 sınıfları ve hariç tutulan sınıflar Şekil 6'da sunulmuştur. Rastgele nokta üretimi: Maskeleme işleminin ardından, çalışma alanında her bir sınıf alanına 1000 nokta ve noktalar arası 500 m kriterleriyle rastgele noktalar üretilmiş ve bu noktalar analizlerde kullanılmıştır. Noktalarda her bir modele ait yüksekliklerin farklarının değerlendirilmesiyle, doğruluk seviyeleri belirlenmiştir.



Şekil 6. CLC2018 Arazi sınıfları, çıplak arazi sınıfı olarak seçilen ve hariç tutulan sınıflar

Doğruluk analizleri: İstatistiksel değerlendirmeler sonucu elde edilen parametreler Tablo 1’de sunulmuştur. Yapılan doğruluk analizi sonucunda, global açık erişimli modellerin %90 ve %89 doğrulukla kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 1. Yükseklik modellerinin SYM5-L0 ile karşılaştırılmasından elde edilen doğruluk analizi sonuçları

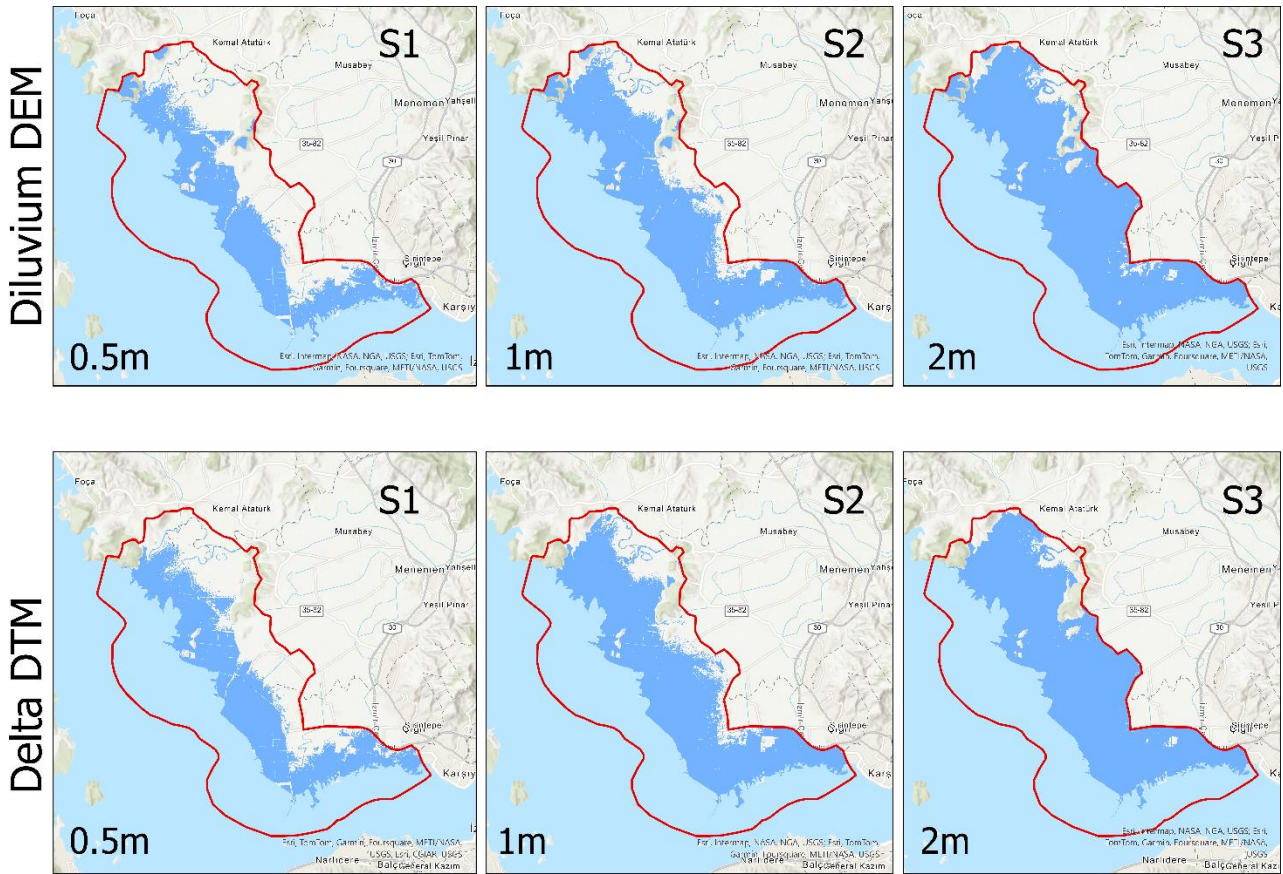
Model	Ortalama Hata (ME)	Ortalama Mutlak Hata (MAE)	Karesel Ortalama Hata (RMSE)	Standart Sapma (SD)	Doğruluk Oranı (%)
Diluvium DEM	-1,37 m	1,67 m	2,45 m	2,032 m	%90
Delta DTM	-1,89 m	1,99 m	3,46 m	2,893 m	%89

Menteş mareograf istasyonu deniz seviyesi projeksiyonları: Doğruluk analizlerinden elde edilen modellerin güvenilirliği, deniz seviyesi projeksiyonlarının karşılaştırılmasında temel teşkil etmiştir. SYM5-L0 modeliyle yapılan doğruluk değerlendirmesi sonucunda elde edilen güvenilirlik seviyeleri hem IPCC senaryolarından hem de TUDES verilerinden hesaplanan trendlerin karşılaştırılması için sağlam bir temel oluşturmuştur. Gerçekte zaman içindeki deniz seviyesi değişimi nadiren doğrusal olsa da Mentēş mareograf istasyonundaki deniz seviyesi değişiminin son 25 yıldaki doğrusal eğilimin hesaplanması, istasyon genelinde yükselme ya da düşme oranına dair bir gösterge sağlamaktadır. Bu doğrultuda; TUDES verileri ile 3,7 mm/yıl olarak hesaplanan doğrusal bir artış hızıyla bu yüzyılın sonunda Mentēş mareograf istasyonunda yaklaşık 28 cm’lik bir deniz seviyesi yükselmesi beklenebilir. Tablo 2’de, Mentēş mareograf istasyonu için SSP senaryolarına göre NASA Sea Level Projection Tool’dan sağlanan deniz seviyesi artış projeksiyonları ile TUDES verileri kullanılarak hesaplanan yerel deniz seviyesi artış projeksiyonları yer almaktadır.

Tablo 2. Menteş mareograf istasyonunda deniz seviyesinin yıllara göre projeksiyon değerleri

Yıl	SSP5-8.5 Düşük Güvenilirlik	SSP5-8.5	SSP3-7.0	SSP2-4.5	SSP1-2.6	SSP1-2.6 Düşük Güvenilirlik	SSP1-1.9	TUDES verisi
2030	0,13 m	0,12 m	0,12 m	0,12 m	0,12 m	0,12	0,12 m	0,02 m
2050	0,28 m	0,27 m	0,25 m	0,24 m	0,23 m	0,23	0,20 m	0,1 m
2100	0,91 m	0,80 m	0,71 m	0,60 m	0,50 m	0,50	0,41 m	0,3 m
2150	2,00 m	1,35 m	1,19 m	0,97 m	0,79 m	0,74	0,61 m	0,5 m

Senaryo 1: 0,5 m, Senaryo 2: 1 m ve Senaryo 3: 2 m için deniz seviyesi altında kalacak alanlar analiz edilmiştir. Bu projeksiyonlar; 2030, 2050, 2100 ve 2150 yılları için senaryolara dayalı olarak analiz edilmiştir. 2030 yılı itibarıyla, SSP senaryoları altında öngörülen artışlar 0,12 m civarında değişirken, TUDES verilerinden hesaplanan değer 0,02 m olarak daha düşük bir artış göstermektedir. 2050 yılına gelindiğinde, IPCC projeksiyonları 0,20 m ile 0,28 m arasında değişirken, TUDES verileri ile bu değer 0,1 m olarak öngörülmektedir. 2100 yılında, SSP senaryolarındaki artışlar 0,41 m ile 0,91 m arasında değişirken, TUDES verilerinden hesaplanan artış 0,3 m olarak daha düşük kalmaktadır. 2150 yılı itibarıyla ise SSP senaryoları altında en yüksek artış 2,00 m olarak öngörülmürken, TUDES verileri bu artışı 0,5 m olarak projekte etmektedir. Bu değerlerden hareketle düşük, orta ve yüksek risk senaryoları olarak, Gediz Deltası'nda 0,5 m, 1 m ve 2 m deniz seviyesi yükselmesi analiz edilmiştir. Bu değerlerle yapılacak bir analiz, TUDES verilerinden 2150 projeksiyonunu ve SSP düşük ve yüksek güvenilirlik senaryolarını test etmek için uygun bulunmuştur. Bu doğrultuda deniz seviyesi altında kalacak alanlar belirlenmiş ve Şekil 7'de verilmiştir. Diluvium DEM ve Delta DTM, 3 farklı senaryo kapsamında değerlendirilmiştir.

**Şekil 7.** 0,5 m, 1 m ve 2 m deniz seviyesi yükselme senaryolarına göre gerçekleşen deniz seviyesi artışları ve su altında kalacak alanlar

Bu alanların toplam alan üzerindeki etkisini gösteren değerleri içeren Tablo 3 incelendiğinde delta alanının en iyi senaryoya göre yaklaşık %50'sinin, en kötü senaryoya göre de yaklaşık %88'inin delta alanının sular altında kalacağı görülmektedir.

Tablo 3. Deniz seviyesi artış projeksiyonları sonucu sular altında kalacak alanlar

Model	Deniz Seviyesi (su) altında kalacak alanlar					
	Senaryo 1 (0,5 m)		Senaryo 2 (1 m)		Senaryo 3 (2 m)	
	Alan (m ²)	%	Alan (m ²)	%	Alan (m ²)	%
Diluvium DEM	92.056.700,87	48,49	133.135.283,31	70,12	166.271.135,78	87,57
Delta DTM	95.585.511,66	50,34	137.092.667,39	72,21	166.379.668,35	87,63
Toplam Delta Alanı	189.865.809,00					

0,5 m deniz seviyesi yükselmesi durumunda, su altında kalan alanlar her iki modelde de toplam alanın yaklaşık yarısını kapsamaktadır; bu durum Diluvium DEM için 92 milyon m²'nin üzerinde, Delta DTM için ise yaklaşık 95,5 milyon m²'ye denk gelmektedir. Deniz seviyesinin 1 m'ye yükselmesiyle birlikte etkilenen alanların belirgin şekilde arttığı gözlemlenmekte; Diluvium modelinde 133 milyon m²'yi, Delta modelinde ise 137 milyon m²'yi aşmaktadır. En yüksek senaryo olan 2 m yükselmeye, her iki modelde de etkilenen alanların 166 milyon m² seviyelerine ulaşarak toplam alanın yaklaşık %87'sine denk geldiği görülmektedir. Bu değerler, deniz seviyesindeki her 1 m artışın kıyı bölgelerinde büyük etkiler yarattığını ve su altında kalacak alanların dramatik şekilde büyüdüğünü göstermektedir. Ayrıca, farklı senaryolar ve modeller arasında gözlemlenen alan büyüklükleri, Gediz Deltası'nın deniz seviyesindeki değişimlere karşı oldukça hassas olduğunu ortaya koymaktadır.

Tablo 4'te, CORINE 2018 verisine dayalı arazi örtüsü sınıflarının, Delta DTM ve Diluvium DEM modellerine göre oluşturulan üç deniz seviyesi yükselme senaryosunda (S1: +0,5 m, S2: +1 m, S3: +2 m) sular altında kalma potansiyeli analiz edilmiştir.

Tablo 4. Deniz seviyesi artış projeksiyonları sonucu sular altında kalacak alanların arazi kullanımıyla ilişkisi

	T.Alan (ha)	Delta DTM S1 - 0,5m		Delta DTM S2 - 1m		Delta DTM S3 - 2m		Diluvium DEM S1 - 0,5m		Diluvium DEM S2 - 1m		Diluvium DEM S3 - 2m	
		Alan (ha)	Alan %	Alan (ha)	Alan %	Alan (ha)	Alan %	Alan (ha)	Alan %	Alan (ha)	Alan %	Alan (ha)	Alan %
212: Sürekli sulanan tarım arazileri	7114	998	14	4038	57	6382	90	591	8	3449	48	6221	87
231: Meralar	752	405	54	665	88	695	92	315	42	642	85	682	91
243: Tarımla birlikte önemli ölçüde doğal bitki örtüsüne sahip alanlar	202	167	83	201	99	201	100	136	68	201	99	201	99
321: Doğal çayırlar	481	0	0	28	6	112	23	88	18	98	20	164	34
323: Sert yapraklı (sklerofil) bitki örtüsü	967	9	1	21	2	57	6	291	30	300	31	337	35
324: Geçiş alanı (orman-çalı karışımı)	436	14	3	136	31	382	88	12	3	72	17	233	53
331: Kumsallar, kumullar, kum alanlar	2662	2379	89	2624	99	2646	99	2202	83	2605	98	2625	99
421: Tuzlu bataklıklar	963	955	99	962	100	962	100	941	98	960	100	960	100
422: Tuzlalar (salinler)	3883	3736	96	3867	100	3882	100	3724	96	3839	99	3874	100

Hem model hem senaryo düzeyinde, farklı arazi sınıflarının maruz kalma düzeylerinde belirgin farklılıklar gözlemlenmektedir. Sürekli sulanan tarım arazileri (212), özellikle S3 senaryosunda her iki modelde de yüksek düzeyde etkilenmektedir (%90 ve %87). Bu, delta tarım arazilerinin büyük ölçüde deniz seviyesi artışına maruz kalacağını göstermektedir. Meralar (231) ise her iki modelde de orta seviyeden yüksek seviyeye doğru artan bir etkilenme eğilimi göstermekte; S3 senaryosunda %91'e varan bir su altında kalma oranına ulaşmaktadır. Doğal çayırlar (321) ve sert yapraklı (sklerofil) bitki örtüsü (323) sınıfları, özellikle Delta DTM ile yapılan analizde düşük etkilenme oranlarına sahiptir (S3 senaryosunda sırasıyla %23 ve %6). Ancak Diluvium DEM modeline göre bu sınıflarda daha yüksek bir maruz kalma eğilimi gözlenmiştir (%34 ve %35). Bu durum, model kaynaklı yükseklik farklılıklarının habitat maruziyet analizlerinde belirleyici olduğunu göstermektedir.

Geçiş alanları (324) hem Delta DTM hem de Diluvium DEM senaryolarında S3 için sırasıyla %88 ve %53 oranında su altında kalma potansiyeli göstermektedir. Bu sonuç, düşük kotlara yayılmış orman-çalı karışımı alanların özellikle kritik eşiklerde hızla risk altına girdiğini ortaya koymaktadır. Kumsallar, kumullar ve kum alanlar (331) için tüm senaryolarda yüksek düzeyde etkilenme gözlenmiştir (her iki modelde de S3 senaryosunda %99).

Benzer şekilde tuzlu bataklıklar (421) ve tuzlalar (422) sınıfları da hem DTM hem de DEM temelli analizlerde en yüksek duyarlılığı sergileyen gruplar arasında yer almakta; bu alanların neredeyse tamamı (>%98) tüm senaryolarda sular altında kalmaktadır. Tarım ile birlikte doğal bitki örtüsüne sahip alanlar (243) ise tüm senaryolarda oldukça yüksek etkilenme oranları ile öne çıkmaktadır. Özellikle S2 ve S3 senaryolarında %99 ve %100 oranları ile tümüyle su altında kalması beklenmektedir.

Bu sonuçlar, delta düzeyindeki düşük kotlara yayılmış hassas arazi sınıflarının, deniz seviyesi artışına karşı yüksek düzeyde duyarlılık taşıdığını göstermektedir. Ayrıca, yükseklik modelinin (DTM vs. DEM) seçimi analiz çıktıları üzerinde önemli etkiler doğurmakta olup, özellikle habitat koruma ve kıyı yönetimi çalışmalarında model kaynaklı belirsizliklerin dikkate alınması gerekmektedir.

Çalışmada kullanılan her iki modelde de düşey doğrulukların birbirine yakın olması ve doğruluk değerlendirmesinin SYM5-L0 gibi ± 3 m doğruluğa sahip bir modelle yapılması sonucu yakın değerler elde edilmektedir. Aslında kıyı su baskını ya da taşkın analizlerinde düşey doğrulukların ± 1 m ve daha yüksek tercih edildiği önceki bölümlerde belirtilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı global anlamda açık veri sunan ve doğruluklarının iklim değişikliği senaryolarındaki deniz seviyesi projeksiyonlarına uygulanabilirliğini açıklayan Diluvium ve Delta gibi modellerin, Türkiye kıyılarında uygulanabilirliğini, ulusal kapsamlı ve erişilebilir bir yükseklik verisi ile test etmektir. Bu amaçla elde edilebilen en yüksek doğruluklu SYM5-L0 modeli kullanılmıştır ve elde edilen sonuçlar, global kıyı modellerinin ulusal model yerine kullanılabilirliğini kanıtlamaktadır. Deniz seviyesi yükselmelerindeki küçük değerler ve bu yükseklik modellerinin doğrulukları karşılaştırıldığında uygulanamaz gibi gözükse de bu modellerin global kök karesel ortalama hataları 1,7 m ve 0,7 m olarak hesaplanmıştır ve bu değerler kötü senaryoların analizinde yeterli görülmektedir.

Elde edilen bulgular, Türkiye’de deniz seviyesi yükselmesi, kıyı riski, yükseklik modeli doğruluk analizi ve arazi kullanım değişimlerine odaklanan çalışmalarla hem yöntemsel hem de niceliksel açıdan paralellik göstermektedir. Doğruluk analizlerinde Diluvium DEM ve Delta DTM modellerinin SYM5-L0 referansına göre sırasıyla %90 ve %89 oranlarında ± 3 m doğruluk sınırında kalması, Özdemir ve Akbaş (2023) ile Akdeniz (2022) gibi çalışmalarda yüksek doğruluk bulgularıyla örtüşmektedir. Gediz Deltası özelindeki kıyı değişimi ve taşkın senaryoları ise Tağıl vd. (2023) ve Tulger vd. (2015) tarafından önerilen mekânsal risk alanlarıyla benzerlik göstermekte, deltaik alanların duyarlılığına dikkat çeken Simav ve Şeker (2013) ile Geymen ve Dirican (2016) çalışmalarını desteklemektedir. TUDES ve SSP senaryoları ile yapılan deniz seviyesi projeksiyonları da, Ercanlı ve Savaşır (2022) tarafından vurgulanan yerel veri temelli adaptasyon ihtiyacını doğrular niteliktedir. Ayrıca, CORINE 2018 verisiyle yapılan sınıflandırmaların Aydın (2022) çalışmasıyla benzer şekilde güvenilir sonuçlar sunması, kullanılan yöntemin akademik geçerliliğini pekiştirmektedir. Sediment kirliliği (Uluturhan Suzer vd., 2015) ve tarihsel kıyı değişimleri (Öner & Vardar, 2018) gibi çevresel göstergelerle de desteklenen bulgular, delta sisteminin hem geçmişte hem de günümüzde hassasiyetini koruduğunu göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, ulusal literatürdeki mekânsal risk analizleri (Erdem, 2013; Simav vd., 2015) ile kavramsal düzeyde de örtüşmektedir.

Sonuç olarak, bu araştırma Gediz Deltası özelinde gerçekleştirilmiş çalışmalarla tutarlı bulgular üretmekte; önerdiği yöntemsel çerçeveye Türkiye kıyılarına yönelik benzer analizler için uygulanabilir ve karşılaştırılabilir bir örnek sunmaktadır. Gelecekte, LIDAR vb. yöntemlerle elde edilebilecek kıyı veri setleriyle bu analizlerin yapılması sonucu daha sağlıklı veriler elde edilebilecektir. Bu çalışmadaki amaç, kıyı modellerinde global açık kaynak veri kaynaklarının kullanılabilirliğinin araştırılması ve bu veri setleriyle gerçekleştirilen analizlerde ortaya çıkabilecek sonuçlardır.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, Gediz Deltası’nda deniz seviyesi yükselmesi senaryolarına dayalı olarak kıyı alanında meydana gelebilecek değişimlerin sayısal yükseklik modelleriyle incelenmesini hedeflemiş ve yapılan analizler önemli bulgular ortaya koymuştur. Çalışmada kullanılan Diluvium DEM, Delta DTM ve SYM5-L0 modelleri, farklı çözünürlük ve doğruluk düzeylerine sahip olmasına karşın, Gediz Deltası’nın kıyı alanlarında deniz seviyesi artışı ve kıyı taşkınlarının etkilerinin doğru bir şekilde simüle edilebilmesi adına büyük bir potansiyel taşımaktadır. Model doğruluklarının değerlendirilmesinde, CORINE 2018 veri seti ile yapılan maskeleme işlemi, bina ve bitki örtüsü gibi yüzey üzerindeki nesnelerden kaynaklanan hata etkilerini ortadan kaldırarak, yalnızca doğal arazi koşullarına dayalı analizlerin yapılmasına olanak sağlamıştır.

Çalışma süresince yapılan RMSE ve MAE gibi istatistiksel metrikler kullanılarak yapılan analiz, modellerin doğruluğunu ölçerken, kıyı taşkınları gibi kritik uygulamalarda hangi modelin daha güvenilir sonuçlar vereceğine dair önemli veriler sunmuştur. Ayrıca, doğruluk sınırları analiziyle, her bir modelin yükseklik farklarının SYM5-L0 referans modelinin ± 3 m düşey doğruluğuyla uyumlu olup olmadığı değerlendirilmiş ve bu sınırın aşıp aşmadığı kontrol edilmiştir. Çalışma, bu doğruluk sınırları doğrultusunda, Diluvium ve Delta modellerinin taşkın yönetimi ve kıyı planlaması gibi kritik uygulamalarda bu model yerine kullanım için yeterli doğruluğa sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bulgular, özellikle IPCC’nin 2021 tarihli Altıncı Değerlendirme Raporu (AR6) doğrultusunda yapılan deniz seviyesi artış projeksiyonları ile desteklenmiştir.

Bu projeksiyonlar, küresel ve yerel düzeyde deniz seviyesi yükselmesinin gelecekteki etkilerini analiz etmek için güçlü bir temel sunmaktadır. Çalışma, IPCC'nin sera gazı emisyon senaryoları ve TUDES verileri kapsamında Gediz Deltası'ndaki deniz seviyesi artışını modelleyerek, bölgedeki kıyı taşkınlarının ve ekosistem değişimlerinin gelecekteki olası etkilerini tahmin etmiştir.

Sonuç olarak, Gediz Deltası'ndaki deniz seviyesi artışının ve olası sonuçlarının daha iyi anlaşılabilmesi için bu çalışma, sayısal yükseklik modellerinin doğruluğunun değerlendirilmesinin yanı sıra, iklim değişikliğinin potansiyel etkilerinin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesine olanak tanımıştır. Çalışma, özellikle düşük ve yüksek çözünürlükteki modellerin karşılaştırılması, doğruluk sınırlarının belirlenmesi ve deniz seviyesi projeksiyonlarının analiz edilmesi gibi adımlar ile kıyı bölgelerindeki risklerin yönetilmesi için önemli bir temel sunmaktadır. Bu tür çalışmalar, gelecekteki kıyı taşkınları ve deniz seviyesi artışı gibi iklim değişikliği kaynaklı risklerin yönetimi ve önlenmesi için bilimsel temelli stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır. Kıyı yönetimi ve afet risk azaltma politikalarının güçlendirilmesi için, daha yüksek doğrulukta modellerin kullanılması, yerel veri setleriyle entegre çözümlerin geliştirilmesi ve deniz seviyesi değişimlerinin etkilerinin daha ayrıntılı şekilde modellenmesi büyük bir öneme sahiptir.

Teşekkür

Menteş mareograf istasyonu verilerini, <https://tudes.harita.gov.tr/> web sayfasından sağlayan Harita Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz. Bu çalışmanın sonuçları TMMOB 8. Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi'nde sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

Kaynaklar

- Akdeniz, M. (2022). *Göktürk-1 uydu görüntülerinden üretilen sayısal yükseklik modelinin doğruluğunun araştırılması* [Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Alevkayalı, Ç., & Tağıl, Ş. (2018). Ortak malların trajedisi üzerine teoriler: Gediz Deltası'nda arazi kullanımı–arazi örtüsü değişimi. *SDÜ Fen-Edebiyat Fakültesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 43, 120–142.
- Arslan, E. S., & Örcü, Ö. K. (2019). Bodrum ilçesinin 1990–2018 yılları arasındaki arazi örtüsü değişimi. In E. E. Akyüz Levi, Y. Dönmez, B. Şimşek İlhan (Eds.), *Mimarlık, planlama ve tasarım alanında araştırma makaleleri* (pp. 181–198). Gece Kitablığı.
- Aydın, T. K. (2022). *İklim değişikliğinin Konya Ereğli–Bor Alt Havzasındaki arazi kullanımı/örtüsü ve kentsel gelişime etkilerinin belirlenmesi* [Doktora tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Bayar, R., & Karabacak, K. (2017). Ankara ili arazi örtüsü değişimi (2000–2012). *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 15(1), 59–76. https://doi.org/10.1501/Cogbil_0000000181
- Bozduman, Ş. (2019). Sınıflandırma yöntemiyle sulak alanların değişimi analizi: Dipsiz Lagün örneği. *Türkiye Uzaktan Algılama Dergisi*, 1(1), 16–20.
- Çam, A., Fırat, O., & Yılmaz, A. (2013, 11–13 Kasım). Harita Genel Komutanlığında ortofoto ve sayısal yüzey modeli üretimi faaliyetleri [Bildiri sunumu]. *TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, Ankara, Türkiye.
- Demirkesen, A. C., Evrendilek, F., & Berberoğlu, S. (2008). Quantifying coastal inundation vulnerability of Turkey to sea-level rise. *Environmental Monitoring and Assessment*, 138(1–3), 101–106. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9746-7>
- Demirlenk, G. G. (2022). *Gediz Deltası ekoturizm potansiyelinin araştırılması* [Yüksek lisans tezi, İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi>
- Doğa Derneği. (2023). *Dünya Mirası Gediz Deltası tanıtım kitapçığı*. Doğa Derneği Yayınları.
- Dusseau, D., Zobel, Z., & Schwalm, C. R. (2023). DiluviumDEM: Enhanced accuracy in global coastal digital elevation models. *Remote Sensing of Environment*, 298, Article 113812. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113812>
- Ercanlı, Ç., & Savaşır, G. (2022). Deniz seviyesinin yükselmesi ve taşkınlar karşı kentsel kıyı alanlarının analizi ve adaptasyon stratejileri için bir yaklaşım: İzmir örneği. *Planlama*, 32(3), 361–382.
- Erdem, U. (2013). Yerleşimlerin taşıdığı deniz taşkını, sel ve deprem afet tehlikelerinin CBS kullanılarak yorumlanması: Balıkesir örneği. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(2), 40–57.
- Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Edwards, T. L., Gollledge, N. R., Hemer, M., Kopp, R. E., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nowicki, S., Nurhati, I. S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Slangen, A. B. A., & Yu, Y. (2021). Ocean, cryosphere and sea level change. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of*

- Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (ss. 1211–1362). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>
- Gazioğlu, C., Burak, S., Alpar, B., Türker, A., & Barut, İ. F. (2010). Foreseeable impacts of sea level rise on the southern coast of the Marmara Sea (Turkey). *Water Policy*, 12(6), 932–943. <https://doi.org/10.2166/wp.2010.050>
- Geymen, A., & Dirican, A. Y. (2016). İklim değişikliğine bağlı deniz seviyesi değişiminin Coğrafi Bilgi Sistemleri kullanılarak analiz edilmesi. *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(1), 65–74. <https://doi.org/10.15659/hartek.16.04.308>
- Gülçin, D. (2018). Arazi kullanımlarının sınıflandırılmasında piksel ve obje tabanlı sınıflandırmanın karşılaştırılması. *Journal of Adnan Menderes University, Agricultural Faculty*, 15(2), 43–49.
- Harita Genel Müdürlüğü. (2024). *Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi*. 13 Kasım 2024'te <https://tudes.harita.gov.tr/> adresinden alındı.
- Harita Genel Müdürlüğü. (2025). *Sayısal Yükseklik Modeli 5m Seviye-0*. 18 Nisan 2025'de <https://www.harita.gov.tr/urun/sayisal-yuzey-modeli-5-m-seviye-0-sym5-l0-/1> adresinden alındı.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Summary for policymakers*. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou (Eds.), *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Kaya, Ç. M. (2022). Taşkın duyarlılık haritalarının oluşturulmasında kullanılan yöntemler. *Türkiye Uzaktan Algılama ve CBS Dergisi*, 3(2), 191–209. <https://doi.org/10.48123/rsgis.1129606>
- Ozsahin, E., Ozdes, M., Ozturk, M., & Yang, D. (2023). Coastal vulnerability assessment of Thrace Peninsula: Implications for climate change and sea level rise. *Remote Sensing*, 15(23), Article 5592. <https://doi.org/10.3390/rs15235592>
- Öner, E., & Vardar, S. (2018). Gediz Deltası paleocoğrafyasında Panaztepe'nin limanını bulma umudu. *Journal of Awareness*, 3(Özel Sayı), 1–18. <https://doi.org/10.26809/joa.2018145260>
- Özdemir, H., & Akbaş, A. (2023). Sayısal yükseklik modellerindeki mekânsal çözünürlük değişkenliğinin taşkın tehlike analizine etkileri. *Coğrafya Dergisi*, 46, 137–156. <https://doi.org/10.26650/JGEOG2023-1177718>
- Pronk, M., Hooijer, A., Eilander, D., Haag, A., de Jong, T., Vousdoukas, M., Vernimmen, R., Ledoux, H., & Eleveld, M. (2024). DeltaDTM: A global coastal digital terrain model. *Scientific Data*, 11, Article 273. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03091-9>
- Simav, Ö., & Şeker, D. Z. (2013, 11–13 Kasım). Kıyı etkilenebilirlik göstergesi ile Türkiye kıyıları risk alanlarının tespiti [Bildiri sunumu]. *TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, Ankara, Türkiye.
- Simav, Ö., Şeker, D. Z., Tanık, A., & Gazioğlu, C. (2015). Kıyı etkilenebilirlik göstergesi ile Türkiye kıyıları risk alanlarının tespiti. *Harita Dergisi*, 153, 1–12.
- Tağıl, Ş., Alevkayalı, Ç., & Aytan, B. (2023). Gediz Deltası sulak alanı boyunca kıyı şeridi evrimi ve erozyon hassasiyetinin değerlendirilmesi. *Ege Coğrafya Dergisi*, 32 (Cumhuriyet'in 100. Yılı Özel Sayısı), 127–142. <https://doi.org/10.51800/ecd.1322803>
- Tırıl, A. (2005, 8–10 Eylül). Bir koruma öyküsü – Gediz Deltası [Sempozyum bildirisi]. *Korunan Doğal Alanlar Sempozyumu*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye
- Tulger, G., Bilgiç, E., & Gündüz, O. (2015, 8–10 Ekim). Olası deniz seviyesi yükselmesi şartlarında Gediz Deltası için bir su altında kalma analizi [Bildiri sunumu]. *VIII. Ulusal Hidroloji Kongresi*, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa, Türkiye.
- Uluturhan Suzer, E., Konaş, A., & Can-Yılmaz, E. (2015). Assessment of heavy metal pollution of surface sediments from lagoon areas of Gediz Delta (Izmir Bay). *Ege Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 32(2), 79–87. <https://doi.org/10.12714/egejfas.2015.32.2.04>
- Yıldız, H., Andersen, O. B., Simav, M., Aktuğ, B., & Özdemir, S. (2013). Estimates of vertical land motion along the southwestern coasts of Turkey from coastal altimetry and tide gauge data. *Advances in Space Research*, 51(9), 1572–1580. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.11.011>
- Yılmaz, O., & Erdem, Ü. (2011). Gediz Deltası'nın uzaktan algılama teknikleri uygulanarak alan kullanım kararları üzerine araştırmalar. *Tekirdağ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 8(1), 53–64.