

İZMİR'DE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ETKİLERİ

DENİZ SEVİYESİ YÜKSELMESİNİN
MEKÂNSAL DEĞERLENDİRMESİ

İZMİR'DE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİNİN ETKİLERİ: DENİZ SEVİYESİ YÜKSELMESİNNİN MEKÂNSAL DEĞERLENDİRMESİ

Süpervizör

Koray Velibeyoğlu, Prof. Dr.

Yazar

Mehmet Kaya

Redaksiyon

Çiçek Ş. Tezer, Dr.

Grafik Tasarım

Kerim Kurtulmuş

Yönetim Yeri

İzmir Planlama Ajansı Konak Mahallesi 848 Sok. No: 77 Ahmet Ağa Konağı 35250 Konak - İzmir

Kaynak Gösterim

Kaya, M. (2024). İzmir'de İklim Değişikliğinin Etkileri: Deniz Seviyesi Yükselmesinin Mekânsal Değerlendirmesi. İzmir Planlama Ajansı, İzmir Büyükşehir Belediyesi.

© 2025

© İzmir Büyükşehir Belediyesi İzmir Kent Kitaplığı / İZELMAN A.Ş., 2024

e-ISBN 978-625-6793-45-3

İzmir Planlama Ajansı'nın ücretsiz yayınıdır. Tüm hakları saklıdır. Tanıtım için yayımlanacak yazılar dışında, İzmir Planlama Ajansı'nın yazılı izni alınmadan çoğaltılamaz ve satılamaz.



İçindekiler

1. Giriş.....	1
1.1. İklim Değişikliği ve Küresel Deniz Seviyesi İlişkisi.....	3
1.2. Materyal ve Metot.....	3
2. Deniz Seviyesi Değişim Projeksiyonları.....	5
3. Deniz Seviyesi Yükselmesinin İzmir Üzerindeki Mekânsal Etkileri.....	6
3.1. Genel Gözlemler.....	9
3.2. İlçelere Göre Alan Kayıpları.....	11
İyi Senaryo (RCP 2.6 – 2040).....	11
Kötü Senaryo (RCP 8.5 – 2100).....	12
3.3. Deniz Seviyesi Değişimlerine Yönelik Yanıt Yaklaşımları.....	13
4. Sonuç ve Öneriler.....	15
5. Kaynaklar.....	16

1. Giriş

İklim değişikliği, 20. yüzyılın özellikle son çeyreğinden itibaren çevresel tartışmaların merkezine oturmuş ve küresel ölçekte en fazla gündeme gelen konulardan biri hâline gelmiştir. Başlangıçta bilimsel çevrelerde ele alınan bu olgu, zamanla insan yaşamı ve doğal sistemler üzerindeki potansiyel etkileri nedeniyle uluslararası politikaların da odak noktası olmuştur. Bu kapsamda, Birleşmiş Milletler'in (UN) öncülüğünde Dünya Meteoroloji Örgütü (WMO) ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı (UNEP) aracılığıyla 1988 yılında Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) kurulmuştur. IPCC, 1990 yılından bu yana yayumlahadığı raporlar aracılığıyla iklim değişikliğini bilimsel temelleriyle değerlendirmekte, bu değişimin etkilerine karşı alınabilecek uyum ve önleme politikalarına yön vermektedir. Özellikle gelecekteki iklim koşullarının anlaşılmasına yönelik yapılan iklim modelleme çalışmaları, bu küresel sorunun bölgesel düzeyde detaylandırmasını mümkün kılmaktır.¹

Hava durumu, iklim ve iklim değişikliği kavramları çoğu zaman birbirine karıştırılmakla birlikte, doğaları ve zaman ölçekleri bakımından önemli farklar içerir. Hava durumu, belirli bir yer ve zamanda gözlenen anlık atmosfer koşullarını; sıcaklık, rüzgâr, basınç, yağış ve bulutluluk gibi değişkenler aracılığıyla ifade eder. Buna karşın iklim, çok daha geniş zaman dilimlerine yayılan, bir bölgedeki ortalama hava koşullarının uzun yıllar boyunca istatistiksel olarak tanımlanmış hâlidir. İklim sistemi; atmosfer, kara yüzeyleri, denizler, buzullar ve canlı varlıklar arasında gerçekleşen karmaşık etkileşimler sonucunda oluşur ve hem iç dinamiklere hem de dışsal etmenlere (volkanik patlamalar, güneş aktivitesi, antropojenik etkiler) bağlı olarak zaman içinde değişimdir. Güneşten gelen radyasyonun miktarındaki değişiklikler, yeryüzünden yansyan enerjideki farklılıklar (albedo) ve sera gazlarıyla tutulan uzun dalga radyasyon, iklim sisteminin enerji dengesini belirleyen temel mekanizmalardır. İklim, bu yönyle yalnızca ortalama hava koşullarını değil, aynı zamanda ekstrem olayları, mevsimsel döngülerini ve ekolojik dengeyi de tanımlar.

İklim sistemi, Dünya'nın yaklaşık 4,5 milyar yıllık tarihinde doğal süreçlerle birçok kez değişikliğe uğramıştır. Jeolojik devirlerde meydana gelen bu değişiklikler, özellikle buzul çağları ve deniz seviyesi dalgalanmaları yoluyla sadece kıtaların şekillenmesini değil, aynı zamanda ekosistemlerin evrimini de derinden etkilemiştir. Ancak günümüzde karşı karşıya olunan iklim değişikliği, insan faaliyetlerinin doğrudan etkisiyle hız kazanmış ve tarihsel süreçlerden farklı bir boyut kazanmıştır.

Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC), yüzlerce bilim insanının katkısıyla yayumlahadığı değerlendirme raporlarında bu değişimin bilimsel, teknik ve sosyoekonomik yönlerini kapsamlı şekilde ortaya koymaktadır. IPCC'nin 2007 tarihli Dördüncü Değerlendirme Raporu'nda, 20. yüzyılın ortalarından itibaren gözlenen küresel yüzey sıcaklığı artışının büyük olasılıkla (%90 güven aralığıyla) insan kaynaklı sera gazı emisyonlarından kaynaklandığı ifade edilmiştir.¹ Devam eden araştırmalar, bu eğilimin giderek güçlendiğini ve 1880'den günümüze atmosfer ile okyanusların ortalama $0,85^{\circ}\text{C}$ isındığını ortaya koymustur. Özellikle son 50 yılda sıcaklık artışı hız kazanmış, bu dönemde ısının birikiminin %90'ı okyanuslarda gerçekleşmiştir. Aynı süreçte Grönland ve Arktik buz küteleri önemli ölçüde hacim kaybetmiş, deniz seviyesi yaklaşık 19 cm yükselmiş ve CO_2 konsantrasyonu sanayi öncesi döneme kıyasla %40 artmıştır.

IPCC'nin 2014 tarihli Beşinci Değerlendirme Raporu (AR5) ise, 21. yüzyıl sonunda RCP2.6 dışındaki tüm senaryolarda küresel sıcaklık artışının $1,5^{\circ}\text{C}$ 'yi aşmasının kaçınılmaz olduğunu ortaya koymaktadır.² Tüm

¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007

² Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014

bu bulgular, ekstrem hava olaylarının şiddetinde ve sıklığında da belirgin artışlara neden olacağını ve bu eğilimlerin gelecekte hız kesmeden devam edeceğini göstermektedir.

İklim değişikliğinin gelecekteki seyrini öngörmek amacıyla geliştirilen iklim modelleri, atmosferdeki sera gazı yoğunluğu, enerji dengesi ve sosyoekonomik eğilimlere bağlı olarak çeşitli senaryolar üzerinden çalışmaktadır. Bu bağlamda, IPCC tarafından geliştirilen Temsili Konsantrasyon Rotaları [Representative Concentration Pathways – RCP], 21. yüzyıl boyunca atmosferde meydana gelebilecek radyatif zorlama (W/m^2) düzeylerini temsil eden dört farklı senaryo dizisini ifade eder. RCP senaryoları; emisyon, konsantrasyon ve enerji dengesine ilişkin projeksiyonları bir arada sunarak, iklim modellerine girdi sağlayan temel yapılardır. 2011 yılında geliştirilen bu senaryolar, eski Emisyon Senaryoları Özel Raporu [Special Report on Emissions Scenarios-SRES] yaklaşımının aksine paralel değerlendirme metoduyla oluşturulmuş ve hem emisyon hem de etki değerlendirme çalışmalarında eş zamanlı kullanılabilmesi amacıyla tasarılanmıştır.³ Bu çalışmada, RCP 2.6, RCP 4.5 ve RCP 8.5 olmak üzere üç farklı senaryo dikkate alınarak deniz seviyesindeki olası artışın mekânsal etkileri değerlendirilmiştir.

RCP 2.6, "Temsili Konsantrasyon Rotası 2.6" olarak adlandırılan ve düşük ışınımsal zorlama düzeyine sahip bir senaryodur. Bu senaryoya göre, küresel sera gazı emisyonlarının 2070 yılı civarında zirve yaparak hızla azalacağı, buna bağlı olarak da ışınımsal zorlamanın yüzyıl sonuna kadar 2.6 W/m^2 seviyesinde kalacağı öngörmektedir. RCP 2.6 senaryosu, 2100 yılına kadar karbon emisyonlarının ciddi şekilde azaltılmasını, yenilenebilir enerjiye geçişin hızlandırılmasını ve ormansızlaşmanın önlenmesini varsayı agresif bir iklim politikası yaklaşımıdır. Bu senaryo, IPCC'nin geçmiş raporlarındaki hiçbir SRES senaryosuyla tam olarak eşleşmemektedir ve iklim değişikliğinin "geri çevrilebilirliği" tartışmalarına bilimsel zemin sunması açısından önem taşımaktadır. Ancak bu düzeyde bir emisyon azaltımı için küresel ölçekte hızlı ve kararlı müdahaleler gerekmektedir.⁴

RCP 4.5, orta düzeyde bir ışınımsal zorlama rotası olup 2100 yılı itibarıyla 4.5 W/m^2 'de sabitlenen bir enerji dengesini öngörmektedir. Bu senaryo, sera gazı emisyonlarının belirli bir noktada kontrol altına alınacağını, ancak mevcut enerji sistemlerinde tamamen karbonsuzlaşmaya gidilmeyeceğini varsayı dengeli bir geçiş senaryosudur. SRES senaryoları ile karşılaşıldığında, RCP 4.5, B1 senaryosu ile benzerlik göstermektedir. Küresel politika gündeminde sıkılıkla referans alınan bu senaryo, iklim değişikliğinin etkilerini azaltmak için yapılan orta düzey müdahalelerin etkilerini gözlemlemek açısından önemli bir temel sağlar. Literatürde oldukça fazla sayıda çalışma bu senaryo üzerine odaklanmıştır ve özellikle şehir planlaması, tarım, su kaynakları yönetimi gibi tematik alanlarda sıkça kullanılmaktadır.⁴

RCP 8.5, yüksek ışınımsal zorlama ve emisyon senaryosudur ve 2100 yılına kadar hiçbir iklim politikası uygulanmaması durumunda oluşabilecek koşulları temsil eder. Bu senaryoya göre CO_2 konsantrasyonu yaklaşık 936 ppm'e, ışınımsal zorlama ise 8.5 W/m^2 seviyesine ulaşacaktır. Emisyonların artarak devam edeceği bu senaryo, SRES senaryoları arasında A1FI ve A2 senaryoları ile benzerlik göstermektedir. RCP 8.5, 21. yüzyıl sonunda küresel sıcaklık artışının 2°C 'yi aşmasının kaçınılmaz olduğunu ve ekstrem iklim olaylarının şiddetinde ciddi artışlar yaşanacağını öngörmektedir. Bu senaryo, hem deniz seviyesi artışı, hem de buzul erimeleri, tarım üzerindeki etkiler, iklim göçleri gibi çok boyutlu riskleri birlikte barındırdığı için, birçok bilimsel çalışmada "en kötü durum [worst-case] senaryosu" olarak kullanılmaktadır.⁴

³ Meteoroloji Genel Müdürlüğü, 2015

1.1. İklim Değişikliği ve Küresel Deniz Seviyesi İlişkisi

Küresel deniz seviyesi, dünya okyanuslarındaki sıvı su hacmiyle doğrudan ilişkili olup, tarih boyunca doğal iklim döngülerine bağlı olarak dalgalanma göstermiştir.⁴ Bu hacmi belirleyen başlıca unsurlar; okyanus suyunun sıcaklığı, tuzluluğu ve en önemlisi, karasal buz kütlelerinin -özellikle kutup buz tabakaları, vadi buzulları ve mevsimsel kar örtüsü- toplam hacmidir. Atmosferdeki sıcaklık artışı, suyun genleşmesine ve buzulların erimesine neden olarak, sıvı su miktarını artırmakta ve böylece küresel deniz seviyesinde yükselmeye yol açmaktadır. Ancak deniz seviyesi yalnızca küresel ortalamalara bağlı değil, yerel dinamikler tarafından da etkilendir. Gelgitler, fırtına kabarmaları, kara yükselme/alçalma süreçleri ve yerel rüzgâr desenleri, belirli bir bölgede gözlemlenen yerel deniz seviyesi değişimini şekillendiren başlıca faktörlerdir. Günümüzde insan faaliyetlerine bağlı olarak artan sera gazı emisyonları, geçmişte binlerce yıl süren doğal değişimlerin çok daha kısa zaman dilimlerinde gerçekleşmesine neden olmakta ve bu durum, özellikle kıyı şehirlerini hızla artan bir risk altına sokmaktadır. Küresel iklim sistemine entegre edilmiş modeller, sera gazı senaryolarına bağlı olarak 21. yüzyıl ve sonrasında deniz seviyesi yükselmesinin hız kazanacağını ve bölgesel düzeyde farklı etkiler göstereceğini ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, "İzmir'de İklim Değişikliğinin Etkileri" başlıklı araştırma serisinin ilk adımını oluşturmaktadır. Söz konusu seri, iklim değişikliğinin İzmir kentinin doğal ve yapılı çevresi üzerindeki etkilerini, senaryo temelli mekânsal analizlerle ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda ilerleyen dönemlerde sıcaklık ve yağış rejimlerindeki değişimler ile bu değişimlere bağlı gelişen etkiler detaylı biçimde incelenecektir. Bu ilk çalışma ise, deniz seviyesindeki yükselenmenin İzmir kıyı alanlarında yol açabileceği olası mekânsal etkileri değerlendirmektedir.

Bu çalışmada, iklim değişikliğine bağlı olarak meydana gelmesi beklenen deniz seviyesi artısını değerlendirmek amacıyla, Hükümetlerarası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) tarafından yayımlanan Okyanus ve Kriyosfer Özel Raporu (SROCC)⁵ temel alınmıştır. Söz konusu raporda yer alan Küresel Ortalama Deniz Seviyesi (GMSL) projeksiyonları, sera gazı salım düzeyine göre şekillenen RCP 2.6, RCP 4.5 ve RCP 8.5 senaryoları için ayrı ayrı sunulmuş ve bu projeksiyonlar üzerinden 2040, 2055 ve 2090 yıllarına ait tahmini su seviyesi değerleri oluşturulmuştur. Bu yaklaşımla, her senaryo ve yıl kombinasyonu için sayısallaştırılmış yükseklik eşikleri belirlenmiş ve modelleme sürecine dâhil edilmiştir^{5,6}. Kıyı çizgisinin güncel temsilini sağlamak amacıyla European Marine Observation and Data Network (EMODnet) tarafından sağlanan kıyı çizgisi verisi kullanılmıştır.⁶ Bununla birlikte, tektonik dikey hareketler, tsunami, deprem veya zemin sivilaşması gibi kısa dönemli jeolojik riskler bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Aynı şekilde, su altında kalabilecek alanların ekonomik değerleri de değerlendirme dışı bırakılmıştır. Bu yaklaşımla amaçlanan, yalnızca iklim değişimine bağlı uzun vadeli deniz seviyesi artısının mekânsal etkilerini senaryo bazlı olarak ortaya koymak ve geleceğe yönelik risk alanlarını görselleştirmektedir.

1.2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, İzmir kıyı alanlarında deniz seviyesinin yükselmesine bağlı oluşabilecek potansiyel risk alanlarını belirlemek amacıyla coğrafi veri tabanlı bir analiz yaklaşımı izlenmiştir. İlk olarak, Copernicus

⁴ Oppenheimer vd., 2019

⁵ Dalfes & Avcı, 2023

⁶ European Marine Observation and Data Network (EMODnet), 2024

GLO-30 Sayısal Yükseklik Modeli (DEM) verisi⁷ temin edilmiş ve İzmir il sınırları bu veriden çıkarılarak çalışma alanı olarak tanımlanmıştır. Kıyı çizgisinin güncel bir şekilde modellenebilmesi amacıyla, European Marine Observation and Data Network (EMODnet) tarafından sağlanan kıyı çizgisi [coastline] verisi⁸ kullanılmıştır.

Güncel su yüzeyi alanlarını tespit etmek amacıyla, Google Earth Engine (GEE) platformu üzerinde 1 Ocak - 15 Mayıs 2025 tarihleri arasındaki Sentinel-2 uydu görüntülerini kullanılarak bulut maskeli bir medyan kompozit görüntü oluşturulmuştur. Bu görüntü üzerinden NDWI (Normalized Difference Water Index)⁹ değerleri hesaplanmış ve Otsu Dinamik Eşikleme Yöntemi¹⁰ ile güncel su yüzeyleri belirlenmiştir.

Çalışmanın modelleme aşamasında, konu ile ilgili olarak yayınlanmış önceki raporlara^{5, 6} dayalı olarak belirlenen deniz seviyesi artış projeksiyonları, her bir senaryo (RCP 2.6, 4.5, 8.5) ve yıl (2040, 2055, 2090) için ayrı ayrı uygulanmış, her eşik için ayrı bir koşul denklemi ile su yüzey alanı maskeleri oluşturulmuştur.

Deniz seviyesi projeksiyonlarına ait su yüzey alanları verisi sayısal verilere dönüştürülmüş, ardından Sentinel-2 verisinden tespit edilen güncel su yüzeyleri bu verilerden çıkarılmıştır. Böylece günümüzde hâlihazırda su yüzey alanı olan kısımlar, deniz seviyesi projeksiyonlarından çıkarılmış ve yalnızca iklim kaynaklı deniz seviyesi değişimiyle etkilenebilecek alanlar elde edilmiştir.

Son olarak, bu alanlar, İzmir İlçe sınırları ve Harita Genel Müdürlüğü (HGM) Türkiye ve Çevresi Coğrafi Ad Dizini verisi¹¹ ile eşleştirilerek ilçe bazlı analiz yapılmıştır. Yine bu alanlar, aynı zamanda güncel arazi örtüsü verisi (ESA WorldCover v200)¹² ile karşılaştırılarak, potansiyel risk altındaki arazi kullanım türleri (yapılmış alan, tarım alanı vb.) ve konumları tespit edilmiştir. Bu çok katmanlı analiz yaklaşımı sayesinde, hem mekânsal hem de tematik olarak deniz seviyesi yükselmesine karşı kırılgan bölgeler detaylı şekilde ortaya konmuştur.

Bu çalışmada kullanılan Copernicus GLO-30 DEM, 30 m yatay çözünürlükte olup dikey doğruluğu küresel ölçekte $LE90 < 4 \text{ m}$ ($\approx \pm 2,5 \text{ m RMSE}$) ve görelî doğruluğu düz arazide $\leq 2 \text{ m}'dir$. Bu belirsizlik bandı, çalışmada ele alınan 0,16–0,78 m deniz seviyesi artış eşiklerinden büyuktur. Dolayısıyla haritalar bölgesel planlama ($\geq 1 : 150\,000$) ölçüngde güvenilir olsa da, santimetre-mertebesi kot farkıyla su baskınına duyarlı parselleri kesin olarak tanımlayamaz. Ayrıca Copernicus DEM bir dijital yüzey modeli olduğundan, kıyı seddesi, dolgu alanı veya rihtim gibi ayrıntılı yapıları çiplak zemin olarak temsil edebilir ve gerçek fiziki engelleri eksik –ya da fazla- tahmin edebilir. $< 0,15 \text{ m}$ düşey hataya sahip LiDAR veya UAV fotogrametri verileriyle yerel güncellemeler yapılması, hem kot ofsetinin hassas kalibrasyonunu hem de hidrolik bağlantı analizlerini iyileştirmek mühendislik düzeyinde karar desteği sağlayacaktır.

⁷ European Space Agency, 2024

⁸ European Marine Observation and Data Network (EMODnet), 2024

⁹ McFeeters, 1996

¹⁰ Otsu yöntemi, bir görüntüdeki en belirgin eşigi otomatik olarak belirlemek için kullanılan matematiksel bir tekniktir. Görüntüdeki piksellerin parlaklık dağılımına (histogram) bakarak, tüm görüntüyü "su" ve "su olmayan" gibi iki grubu en iyi şekilde ayıran eşik değeri hesaplar (Otsu, 1979)

¹¹ Harita Genel Müdürlüğü, 2025

¹² Zanaga vd., 2022

2. Deniz Seviyesi Değişim Projeksiyonları

İklim değişikliğinin etkisiyle küresel deniz seviyesindeki yükselme, son yüzyılın en dikkat çekici çevresel göstergelerinden biri hâline gelmiştir. Buzulların parçalanmasına, kara buzullarının erimesine ve okyanusların ısınmasına bağlı olarak deniz suyunun genleşmesi, bu artışın temel nedenleri arasında yer almaktadır.

Bilimsel projeksiyonlara göre, küresel iklim değişikliği yavaşlasa dahi, deniz seviyesindeki yükselmenin önümüzdeki yüzyıllarda da sürecegi öngörlülmektedir.

Bu kapsamda, çalışmanın temel referans kaynağı olan IPCC Okyanus ve Kriosfer Özel Raporu¹³, sera gazı salım senaryolarına (RCP 2.6, 4.5 ve 8.5) bağlı olarak 2040, 2055 ve 2090 yılları için Küresel Ortalama Deniz Seviyesi (GMSL) tahminleri sunmaktadır. Ancak bu değerler, gezegenin her yerinde eşit şekilde gözlemlenmemektedir. Okyanus dolaşımı, rüzgâr rejimleri ve termal genleşmedeki farklılıklar nedeniyle, deniz seviyesi yükselmesi bölgesel düzeyde ±%30 sapma gösterebilir.

Aşağıdaki tablolar, önceki yıllarda yayınlanmış¹⁴ raporlara dayalı olarak deniz seviyesi projeksiyonlarını özetlemektedir. Bu çalışmada yerel ortalama deniz seviyesi tahminleri¹⁴ (Tablo 2) kullanılmıştır.

Yıl/Senaryo	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
2040 (2031-2050)	0.17 m	0.17 m	0.20 m
2055 (2046-2065)	0.24 m	0.26 m	0.31 m
2090 (2081-2100)	0.39 m	0.48 m	0.70 m

Tablo 1. Küresel ortalama deniz seviyesi tahminleri^{14, 15}

Not: Tablodaki değerler [2031-2050], [2046-2065] ve [2081-2100] dönemlerinin ortanca yılina karşılık gelen tahminler olup, %5-%95 güven aralığı dahilindedir.

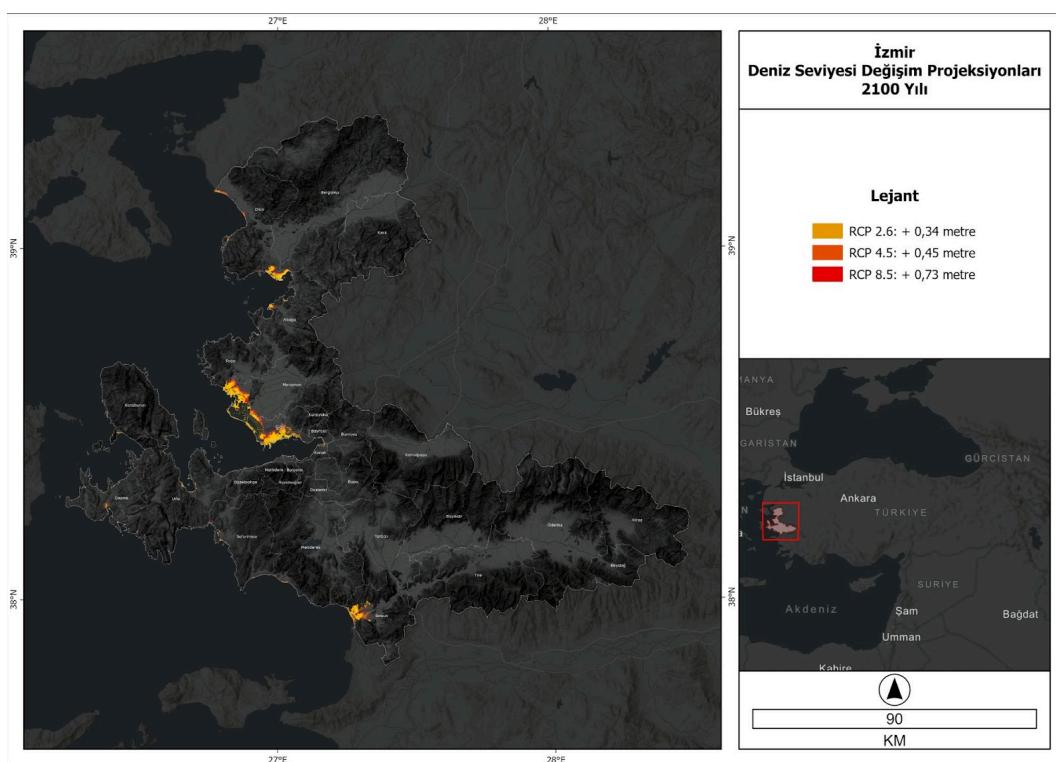
Yıl/Senaryo	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
2040 (2031-2050)	0.15 m	0.15 m	0.17 m
2055 (2046-2065)	0.21 m	0.22 m	0.28 m (0.20-0.37 m)
2090 (2081-2100)	0.31 m	0.40 m	0.60 m
2100*	0.34 m	0.45 m	0.73 m (0.54-1.03 m)

Tablo 2. Yerel ortalama deniz seviyesi tahminleri^{14, 15}

* RCP 8.5 senaryosu altında 2100 yılı için deniz seviyesi artışının 1 metreyi aşabileceği öngörlülmektedir. Bu senaryo, sera gazı emisyonlarında herhangi bir azalma gerçekleşmemesi durumundaki en kötü olasılığı temsil etmektedir (Şekil 1).

¹³ Oppenheimer vd., 2019

¹⁴ Dalfes & Avcı, 2023



Şekil 1. İzmir deniz seviyesi değişim projeksiyonları: 2100 yılı

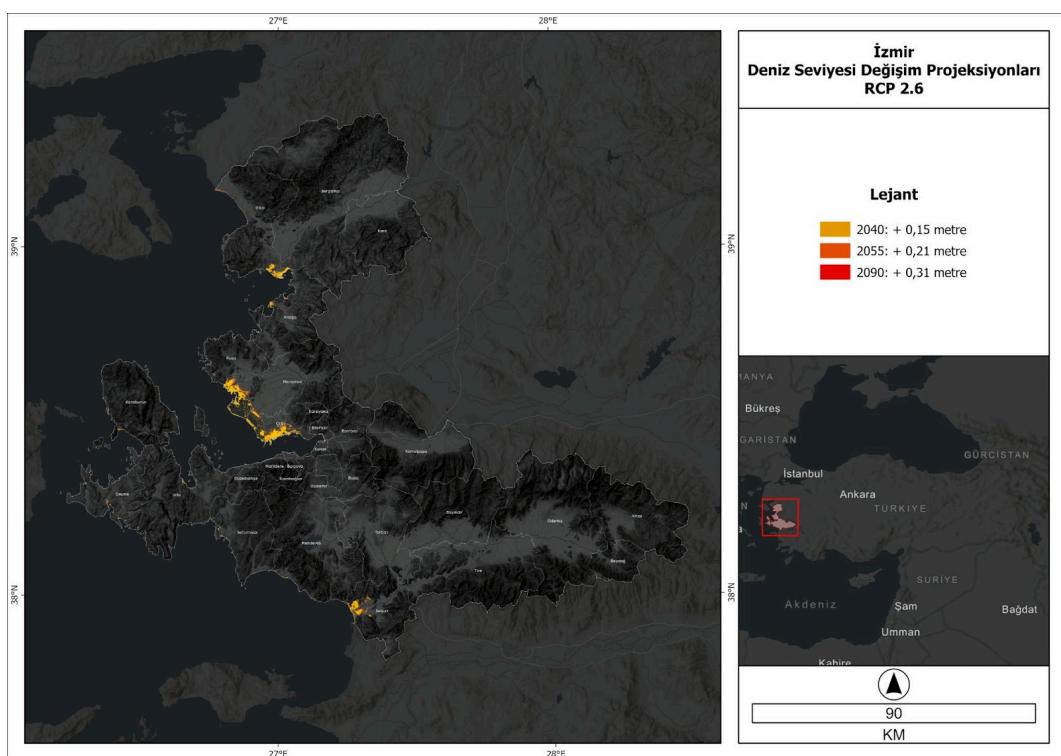
3. Deniz Seviyesi Yükselmesinin İzmir Üzerindeki Mekânsal Etkileri

SROCC projeksiyonları temel alınarak belirlenen deniz seviyesi artış değerleri, sayısal yükseklik modeli (DEM) üzerinde eşik değer olarak uygulanmış ve her bir yıl-senaryo kombinasyonu için potansiyel seviye değişim alanlarını temsil eden ikili raster maskeleri oluşturulmuştur. Bu maskeler, mekânsal analiz ve görselleştirme süreçlerinde kullanılmak üzere sayısal formata dönüştürülmüştür.

Haritalar, üç temel senaryoya (RCP 2.6, RCP 4.5 ve RCP 8.5) ve üç farklı zamansal aralığa (2040, 2055 ve 2090) göre hazırlanmış, böylece toplam dokuz ayrı senaryo-yıl kombinasyonuna ait deniz ilerleme alanları analiz edilmiştir. Haritalar yalnız İzmir ili sınırları içinde kalacak şekilde tasarlanmıştır ve analizler ilçe sınırlarıyla birlikte gerçekleştirilmiştir.

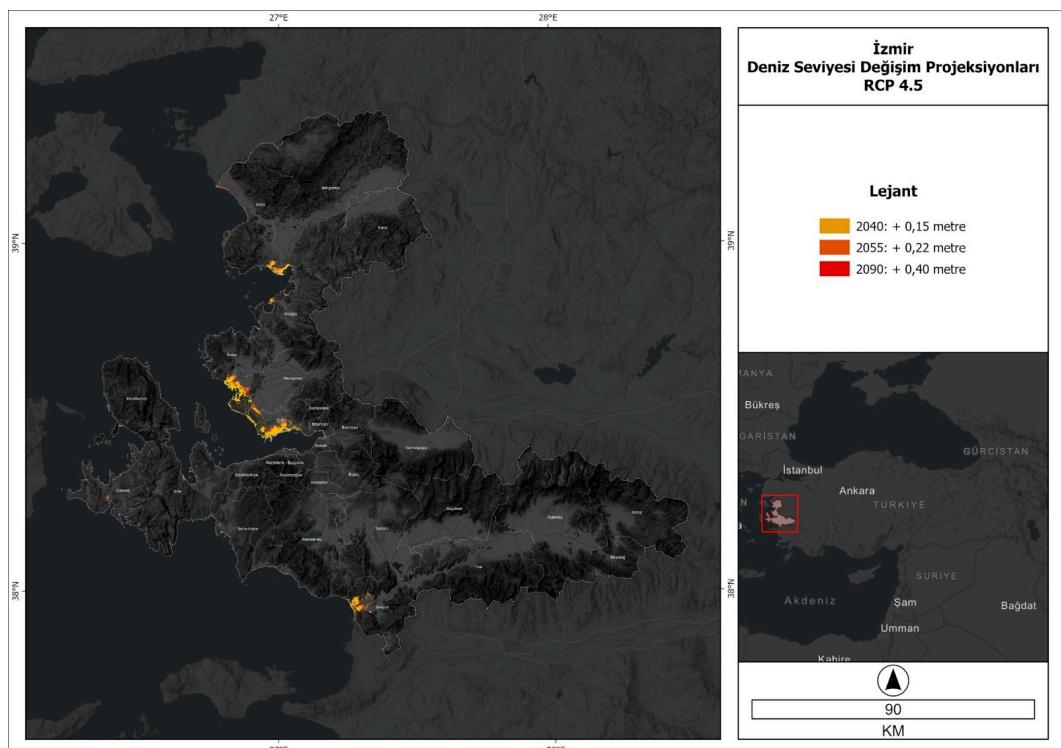
RCP 2.6 (İyimser Senaryo): 2040 yılında deniz seviyesi artışı 0,15 m ile sınırlı kalmakta ve yalnızca alçak kotlu bölgelerde etkili olmaktadır. 2090 yılına gelindiğinde ise artışın 0,31 m düzeyine ulaşmasıyla birlikte özellikle kıyı ovalarında ve sulak alanlarda su baskını riski belirginleşmektedir (Şekil 2).

İzmir Kıyılarında Deniz Seviyesi Yükselmesinin Mekânsal Etkileri



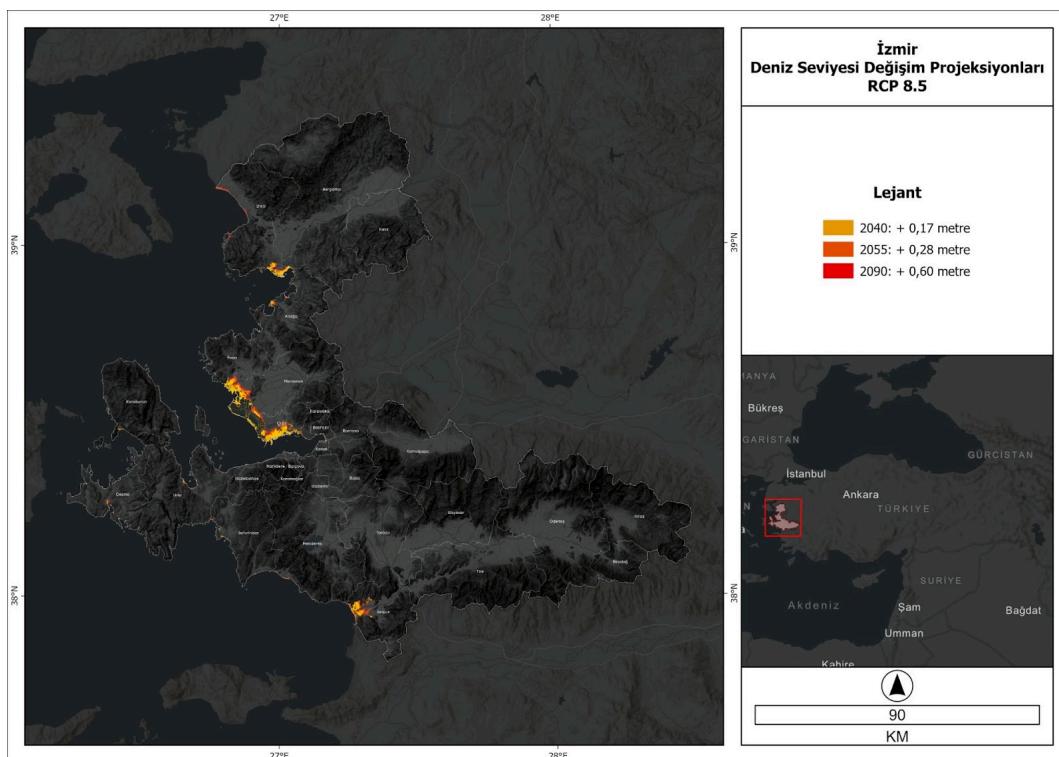
Şekil 2. İzmir deniz seviyesi değişim projeksiyonları: RCP 2.6

RCP 4.5 (Orta Senaryo): Bu senaryoya göre deniz seviyesi, 2040 yılında 0,15 m, 2055 yılında ise 0,22 m artış göstermekte; 2090 yılı itibarıyla ise bu değer 0,40 m seviyesine ulaşmaktadır. Bu durum, İzmir'in kuzey ve güney kıyılarındaki delta ve ova sistemlerinde daha geniş yüzey kayiplarına neden olmaktadır (Şekil 3).



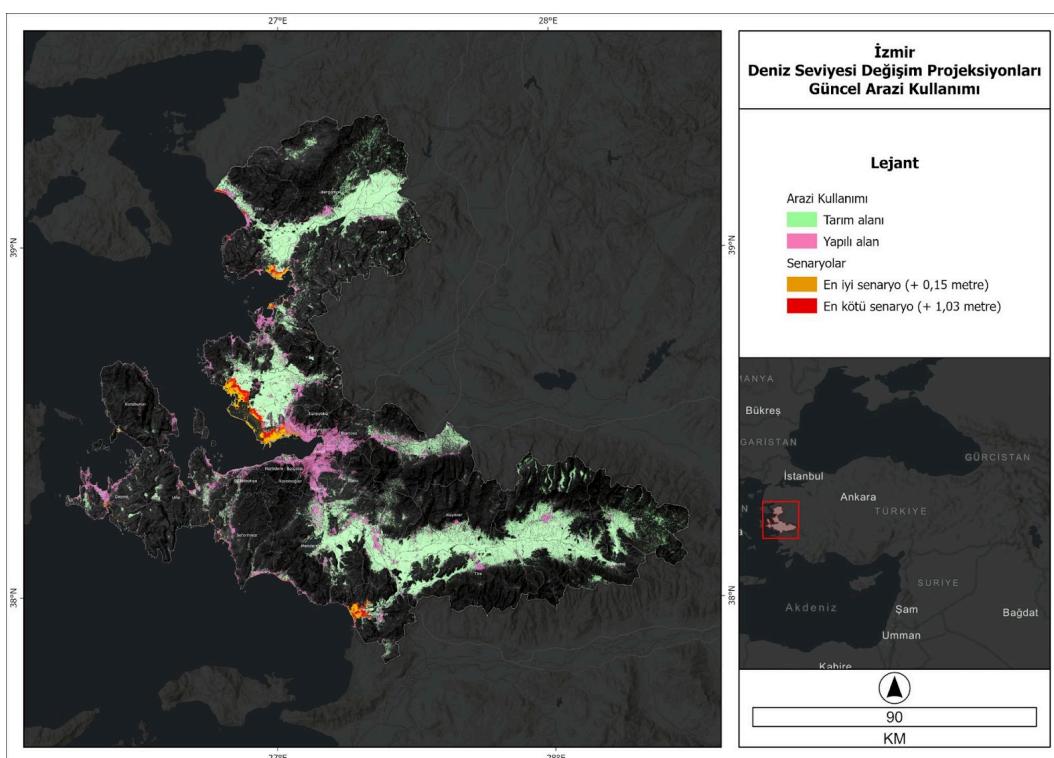
Şekil 3. İzmir deniz seviyesi değişim projeksiyonları: RCP 4.5

RCP 8.5 (Kötümser Senaryo): En yüksek risk düzeyini temsil eden bu senaryoda, 2040 yılında deniz seviyesi artışı 0,17 m, 2055'te 0,28 m, 2090'da ise 0,60 m olarak öngörmektedir. 2100 yılı itibarıyla ise artışın 0,73 m'ye ulaşabileceği, en yüksek seviyede ise 1,03 m'ye kadar çıkabilecegi belirtilmektedir. Bu düzeyde bir yükselme, özellikle Çiğli, Aliağa, Selçuk, Menemen gibi kıyıya yakın, düşük kotlu ilçelerde ciddi mekânsal etkiler yaratma potansiyeline sahiptir (Şekil 4).



Şekil 4. İzmir deniz seviyesi değişim projeksiyonları: RCP 8.5

Ayrıca bu çalışmada, her bir RCP senaryosu için ayrı ayrı haritalar üretilmesinin yanı sıra, en iyimser (RCP 2.6; +0,15 m) ve en kötümser (RCP 8.5; +1,03 m) senaryoların üç değerleri dikkate alınarak karşılaştırmalı mekânsal analizler de gerçekleştirılmıştır. Bu haritalar aracılığıyla deniz seviyesi yükselmesinin İzmir kıyılarındaki mevcut arazi örtüsü/ arazi kullanımı ile olan ilişkisi de analiz edilmiştir. Yapılan çakıştırma analizleri, su altında kalabilecek alanların büyük bir bölümünün günümüzdeki tarım arazilerinden ve doğal sulak alanlardan oluştuşunu, özellikle kötü senaryoda ise yapılaşmış kentsel alanların da etki altına girmeye başladığını göstermektedir (Şekil 5).



Şekil 5. İzmir deniz seviyesi değişim projeksiyonları ve güncel arazi kullanımı

3.1. Genel Gözlemler

Çalışmada üretilen deniz seviyesi değişim haritaları, İzmir'in fiziki coğrafyasının mekânsal etkilerini açık biçimde ortaya koymaktadır. İzmir ili, denize dik uzanan dağ sıraları ve bu dağların arasında şekillenmiş alüvyonal çöküntü ovalarından oluşan karakteristik bir jeomorfolojiye sahiptir. Bu dağlar, kırık fay sistemleri ile parçalanmış olup, kıyıya dik uzanan yükseltiler ve bu yükseltiler arasında alçak kotlu bloklar meydana getirmiştir. İşte bu alçak kotlu bloklar -özellikle Gediz Deltası, Selçuk Ovası, Çandarlı Körfezi çevresi ve Seferihisar kıyıları- deniz seviyesindeki en küçük artışlarda dahi öncelikli olarak etkilenebilecek alanlar arasında yer almaktadır.

Harita analizleri, RCP 2.6 senaryosunda bile (2040: +0,15 m) kıyı şeridine bazı su basma alanlarının oluşabileceğini göstermektedir. Özellikle Çığlı, Aliağa ve Selçuk ilçelerinde bu risk açıkça gözlemlenmektedir. RCP 4.5 senaryosunda (2090: +0,40 m) ise bu risk, kıyı boyunca daha geniş bir alana yayılmakta ve özellikle korunan doğal alanlar, sulak alanlar ve tarım alanları üzerinde belirginleşmektedir.

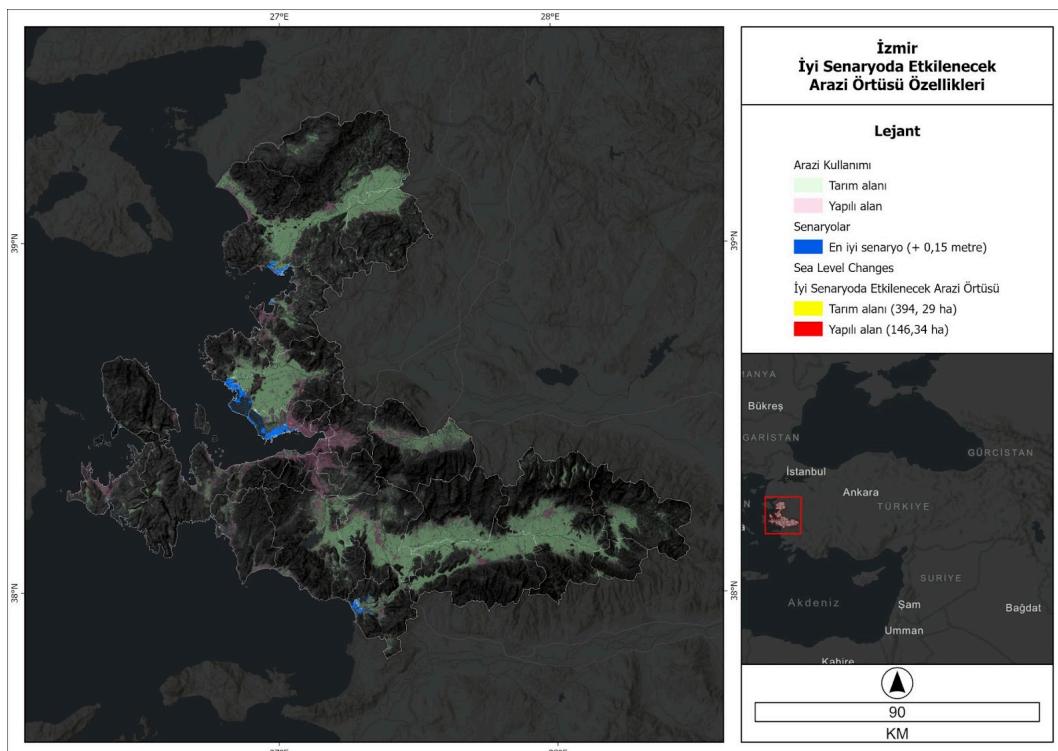
En yüksek etkilerin görüldüğü RCP 8.5 senaryosunda (2090: +0,60 m) ise, İzmir Körfezi çevresindeki alçak kotlu bölgelerde kentsel alanlarla doğrudan etkileşim söz konusudur. Bu senaryoda, Gediz Deltası, Çamaltı Tuzlası, Kuş Cenneti ve Çığlı ilçesi başta olmak üzere pek çok kıyı segmenti önemli ölçüde su altında kalma potansiyeline sahiptir.

Ayrıca İzmir'deki kıyı ovalarının büyük bölümü tarım amaçlı kullanımda olup, bu alanlardaki deniz ilerlemesi yalnızca fiziksel yüzey kaybı değil, aynı zamanda tuzlu suyun yeraltı suyu ile ilişkisine bağlı olarak da tarımsal üretim açısından bazı kayıplara yol açabilecektir.

Özellikle Gediz Deltası'nda yer alan tuz üretim alanları ve kuş türlerinin üreme alanları, deniz seviyesindeki değişimle birlikte hem ekonomik hem de ekolojik açıdan tehdit altındadır.

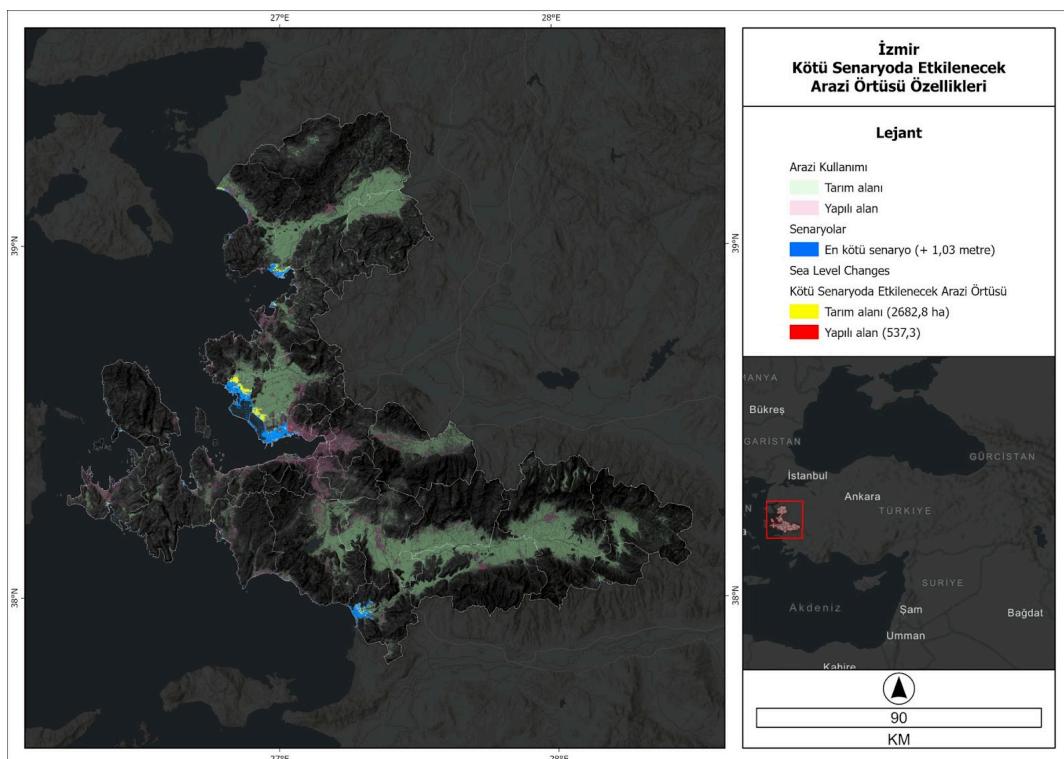
Yapılan detaylı analizler, deniz seviyesindeki yükselmenin yalnızca mekânsal yayılım açısından değil, aynı zamanda etkilenen arazi kullanım türleri bakımından da önemli farklılıklar ortaya koyduğunu göstermektedir. Bu analizlerde, deniz seviyesi değişim projeksiyonları ile güncel arazi örtüsü verileri karşılaştırılmış, böylece bugün var olan kullanım desenlerinin risk altındaki konumları değerlendirilmiştir.

İyimser senaryo olan RCP 2.6 kapsamında (2040: +0,15 m), İzmir'de deniz seviyesinden etkilenmesi muhtemel beşerî alanların önemli bir bölümünü günümüzde tarım arazileri (~390 ha) oluşturmaktadır. Bu alanları, yapılaşmış bölgeler (~145 ha) takip etmektedir. Etkilenmenin özellikle sulak alanlara bitişik tarımsal üretim alanlarında yoğunlaşacağı öngörmektedir.



Şekil 6. İyi senaryoda etkilenecek arazi örtüsü özellikleri

Kötümser senaryo olan RCP 8.5 (2100: +1,03 m) altında ise risk düzeyinin ve etkilenen yüzey alanının belirgin biçimde arttığı görülmektedir. Bu senaryoda da, mevcut arazi örtüsü verileri dikkate alındığında, risk altındaki alanların yine tarım arazileri olduğu anlaşılmaktadır. Güncel sınıflandırmaya göre ~2680 hektarlık tarım alanı ve ~535 hektarlık yapılaşmış alan, deniz seviyesindeki yükselmeden etkilenebilecek potansiyel alanlar arasında yer almaktadır. Özellikle Gediz Deltası, Selçuk Ovası ve Aliağa çevresi, hem tarımsal hem de kentsel yerleşimlerin kesiştiği kritik bölgeler olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 7. Kötü senaryoda etkilenecek arazi örtüsü özellikleri

Ancak bu değerlendirmelerde, karşılaştırma yapılan arazi örtüsü verilerinin günümüzde ait olduğu, dolayısıyla 2040 veya 2100 yıllarındaki olası arazi kullanımı değişikliklerini **icermediği** göz önünde bulundurulmalıdır. Bu nedenle ortaya konulan alan büyüklükleri, mevcut koşulların korunacağı varsayımlı altında oluşturulmuş olasılık temelli öngörüler olarak değerlendirilmelidir. Gerçek arazi kullanımı dinamikleri, zaman içinde kentsel yayılma, tarımsal dönüşüm veya doğal habitat kaybı gibi süreçlerle değişiminden, bu projeksiyonlar gelecekteki planlama senaryolarına yön gösterecek erken uyarı haritaları olarak ele alınmalıdır.

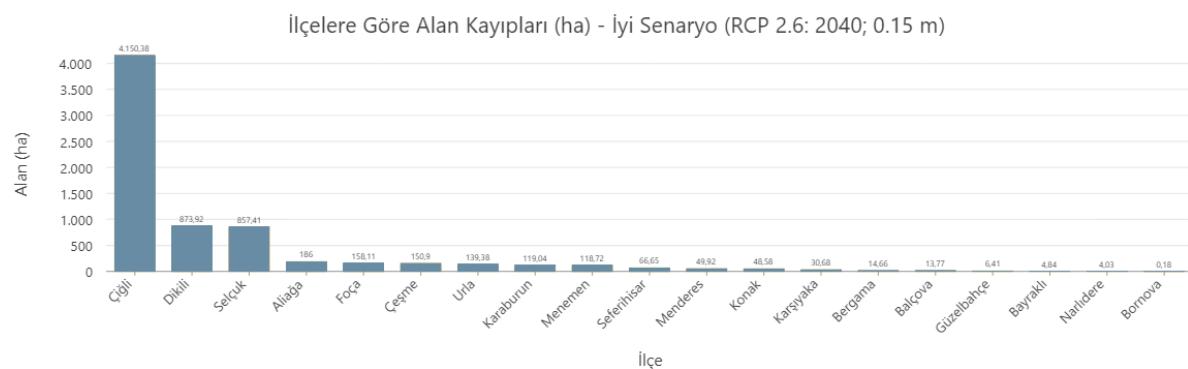
3.2. İlçe'lere Göre Alan Kayıpları

İzmir kıyılarında deniz seviyesindeki yükselenin etkileri, yalnızca fiziki coğrafya açısından değil, aynı zamanda ilçe düzeyinde dağılım gösteren alan kayıpları açısından da önemli farklılıklar ortaya koymaktadır. Yapılan analizlerde, RCP 2.6 (iyi senaryo, 2040) ve RCP 8.5 (kötü senaryo, 2100) için elde edilen veriler, İzmir'in en fazla etkilenecek ilçelerinin mekânsal dağılımını göstermekte ve olası risk düzeylerini ortaya koymaktadır.

İyi Senaryo (RCP 2.6 – 2040)

Bu senaryo kapsamında, deniz seviyesinin +0,15 m artması durumunda İzmir genelinde yaklaşık 8000 hektara yakın bir alanın etkilenebileceği öngörmektedir. Bu etki ağırlıklı olarak kuzey ve batı kıyılarında yoğunlaşmaktadır:

- Çiğli tek başına ~4000 hektar ile en fazla alan kaybı yaşayan ilçe olarak öne çıkmaktadır. Bu durum, Gediz Deltasının topografik açıdan düşük kotlu ve hassas bir alan olmasından kaynaklanmaktadır.
- Dikili (~870 ha) ve Selçuk (~855 ha) gibi tarımsal niteliği ön planda olan ilçelerin doğal kıyıları da yüksek düzeyde etkilenmektedir.
- Aliağa, Foça, Urla ve Çeşme gibi ilçelerde ~100-200 hektar arasında değişen alan kayipları gözlemlenmiştir.
- Kentsel merkez ilçeler olan Karşıyaka, Konak, Balçova gibi yapay kıyı yapılarının geniş yer tuttuğu bölgelerde ise etkiler daha sınırlı düzeyde kalmaktadır.

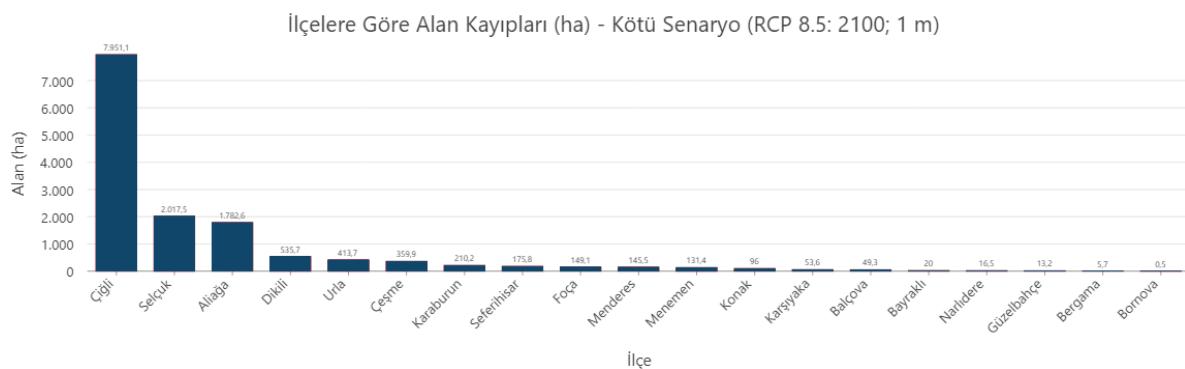


Şekil 8. İlçelere göre alan kayipları: İyi senaryo

Kötü Senaryo (RCP 8.5 – 2100)

Bu senaryo, deniz seviyesinin 1 metreyi aşabileceğinin en kötümser projeksiyonu temsil etmektedir ve sonuçlar da bu durumu doğrular niteliktedir. Yaklaşık 16000 hektarlık alan deniz seviyesi değişimi etkisine açık hâle gelmektedir:

- Çiğli bu senaryoda da arazi kaybı bakımında öne çıkmaktadır. Etkilenmesi muhtemel alan yüzölçümü ~7855 hektara ulaşmaktadır.
- Selçuk (~2000 ha), Aliağa (~1780 ha) ve Dikili (~1825 ha) gibi ilçelerde hem tarım alanları hem de kıyıya yakın yerleşim birimleri deniz seviyesi değişimleri bakımından risk altındadır.
- Urla, Çeşme, Karaburun gibi ilçelerde ~300 ila ~500 hektarlık kayıplar söz konusudur.
- İzmir Körfezi çevresindeki ilçeler, özellikle Konak, Karşıyaka, Mavişehir, Alsancak gibi kıyı bölgeleri, hem fiziki altyapı hem de açık kamusal alanlar açısından nispeten daha az etkilenebilecek öncelikli alanlar arasında yer almaktadır.



Şekil 9. İlçelere göre alan kayıpları: Kötü senaryo

Günümüzde İzmir Körfezi çevresinde fırtına sonrası deniz kabarmalarının kıyı içlerine kadar ilerleyebildiği bilinmektedir. Bu olayların, deniz seviyesindeki artışla birlikte çok daha geniş ve kalıcı etkiler yaratacağı öngörülmektedir.

Öte yandan, deniz seviyesinin yükselmesi yalnızca doğrudan su altında kalacak alanları etkilememektedir. Atıksu arıtma gibi kritik altyapı alanları ve tuzlu suyun yeraltı suyunu karışmasına gibi dolaylı etkiler, hem çevre sağlığı hem de tarımsal sulama açısından yeni sorunlar doğurma potansiyeline sahiptir. Bu risk, özellikle Menemen Ovası gibi sulama alanlarının geleceği üzerinde belirleyici olabilir.

Turizm alanlarının da deniz seviyesi değişimlerinden etkilenmeleri muhtemeldir. Kıyı turizmi destinasyonlarında kıyı şeridinin daralması, plaj kayıpları, altyapı bozulmaları ve yeraltı su seviyesinde tuzlanma gibi etkilerin gözlemlenmesi de olasıdır.

Doğal alanlar açısından bakıldığına ise, Gediz Deltası, Çamaltı Tuzla, Kuş Cenneti, İnciraltı Kent Ormanı ve Küçük Menderes Deltası gibi ekolojik olarak hassas alanlarda, denizle kara arasındaki sınırın değişmesi, alüvyon birikiminin azalması ve hidrolojik dengenin bozulması gibi etkiler uzun vadede geri dönüşü olmayan sonuçlar doğurabilir.

Bu bağlamda, ilçelere göre ortaya konan alan kaybı analizleri yalnızca istatistiksel değil, aynı zamanda mekânsal planlama, kıyı yönetimi ve iklim uyum politikaları açısından da önceliklendirilmesi gereken stratejik bir araç sunmaktadır.

3.3. Deniz Seviyesi Değişimlerine Yöneltik Yanıt Yaklaşımları

İklim değişikliğine bağlı deniz seviyesi yükselmesi, yalnızca fizikal bir risk değil, aynı zamanda sosyal, ekonomik ve yönetsel açılarından da karmaşık karar süreçlerini beraberinde getiren çok katmanlı bir krizdir. Bu kriz karşısında uygulanabilecek yanıtlar [responses], riskin azaltılması ve kıyı bölgelerinin dirençliliğinin artırılması amacıyla geliştirilmiş yasal, mekânsal ve kurumsal stratejilerden oluşmaktadır.

Literatürde deniz seviyesi yükselmesine karşı beş temel tepki tipi tanımlanmaktadır¹⁵: Koruma (Protection), Uyum [Accommodation], İlerletme [Advance], Geri Çekilme [Retreat] ve Ekosistem Tabanlı Adaptasyon [EbA]. Bu stratejiler, çoğu zaman birbiriyle kombin edilerek karma çözümler şeklinde uygulanmaktadır. Her bir tepki tipi, teknik sınırlılıkları, maliyeti, toplumsal kabulü ve yönetişim zorluklarıyla birlikte değerlendirilmelidir.

Koruma: Koruma stratejileri, ortalama veya aşırı deniz seviyelerinin kara içlerine ilerlemesini engellemeyi hedefler. Bu kapsamında fiziksel koruma yapıları (setler, deniz duvarları, mendirekler, bariyerler) ve kıyı besleme uygulamaları (kum setleri, kıyı kumulları) kullanılmaktadır. Ekosistem Tabanlı Adaptasyon (EbA) ile birlikte uygulandığında, bu yapıların doğaya entegre, yeşil altyapı çözümlerine dönüşmesi mümkündür. Örneğin, bir deniz duvarı önünde oluşturulan bataklık kuşağı, dalga enerjisini azaltarak koruma işlevini güçlendirebilir.

Uyum: Uyum stratejileri, kıyı bölgelerinin yaşanabilirliğini sürdürmek için mevcut yapılar ve faaliyetleri deniz seviyesindeki değişime adapte etmeye yöneliktedir. Bu kapsamında binaların yükseltilmesi, tuzlu suya dayanıklı ürünlerin tercih edilmesi, sigorta ve erken uyarı sistemleri gibi kurumsal önlemler yer alır. Ayrıca arazi kullanım değişiklikleri ve kentsel bölgelerde zemin kat kullanımı gibi çözümler de bu başlık altına girer.

İlerletme: İlerletme, denize doğru dolgu yaparak yeni kara alanları kazanılmasını ve mevcut yerleşimlerin korunmasını hedefler. Dolgu malzemesi ile arazinin yükseltilmesi, bitkilendirme ile doğal birikimin desteklenmesi ve polderleşme gibi yöntemler bu strateji kapsamında değerlendirilir. Ancak bu yaklaşım, yüksek mühendislik maliyetleri, çevresel etkiler ve sürdürülebilirlik açısından dikkatle değerlendirilmelidir.

Geri Çekilme: Geri çekilme, yüksek riskli kıyı bölgelerinden insanların, altyapılarının ve faaliyetlerin daha güvenli alanlara taşınmasını ifade eder. Bu strateji; gönüllü göç, zorunlu yer değiştirme ve yönetilen yeniden yerleşim gibi üç alt kategoriye ayrıılır. Etkilenen nüfusun isteği dışında gerçekleşse bile, birçok durumda geri çekilme, uzun vadeli afet riskini azaltmanın en etkili yöntemlerinden biri olabilir. Bu uygulamalar genellikle kamusal teşviklerle (arazi satın alma, yeniden yerleşim programları) yürütülmektedir.

Ekosistem Tabanlı Adaptasyon (EbA): EbA, kıyı ekosistemlerinin (sazlıklar, mangroflar, resifler vb.) korunması, restorasyonu ve sürdürülebilir yönetimine dayanır. Bu yaklaşım, hem dalga enerjisini azaltarak fiziksel koruma sağlar hem de sediment tutarak kıyı yükseltisini artırır. Ekosistem tabanlı çözümler aynı zamanda biyolojik çeşitliliği destekler ve karbon yutak kapasitesini artırır. Bu tür çözümler, yeşil altyapı, doğa temelli çözümler (NbS) veya ekolojik mühendislik gibi adlarla da anılmaktadır.

Sonuç olarak, her bir tepki türü farklı sosyo-ekonomik, coğrafi ve yönetişim koşullarında değişken etkilere sahiptir. İzmir gibi hem yoğun yerleşim hem de ekolojik değeri yüksek kıyı alanlarına sahip bir kentte, bu stratejilerin entegre biçimde değerlendirilmesi ve yerel ölçekli senaryo analizleriyle desteklenmesi, dirençli kıyı yönetimi için kritik önemdedir.

¹⁵ Oppenheimer, M., Glavovic, B. C., Hinkel, J., van de Wal, R., Magnan, A. K., Abd-Elgawad, A., Cai, R., Cifuentes-Jara, M., DeConto, R. M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B., Meyssignac, B., & Sebesvari, Z. (2019). Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, & N. M. Weyer (Eds.), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (pp. 321–445). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.006>

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, İzmir kıyılarında iklim değişikliğine bağlı olarak beklenen deniz seviyesi yükselmesinin mekânsal ve tematik etkilerini analiz etmeyi amaçlamıştır. IPCC: Okyanus ve Kriosfer Özel Raporu temelli projeksiyonlara göre, 2100 yılına kadar deniz seviyesinin en kötü senaryoda 1 metreyi aşabileceği öngörümektedir. Bu yükselişin, özellikle Çığlı, Selçuk, Aliağa ve Gediz Deltası gibi alçak kotlu kıyı alanlarında önemli arazi kayıplarına neden olabileceği; tarım arazileri, yapılaşmış alanlar, sulak alanlar ve turizm bölgeleri üzerinde ciddi baskılar oluşturabileceği belirlenmiştir.

Çalışmanın bulguları, deniz seviyesinin yalnızca kıyı çizgisini değil, aynı zamanda kamu hizmetlerini, atık su altyapısını ve doğal yaşam alanlarını da etkileyebileceğini göstermektedir. Özellikle Çığlı Atık Su Arıtma Tesisi gibi stratejik altyapı noktalarının, hem fizikal olarak hem de performans açısından risk altında olabileceği görülmektedir. Bu durum, iklim değişikliğine uyumun ve yerel düzeyde alınacak önlemlerin aciliyetini ortaya koymaktadır. Bu çalışmanın en önemli çıktılarından biri, yerel ölçekli etki analizlerinin ulusal ve yerel iklim politikalarına entegrasyonunun ne kadar gerekli olduğunu göstermesidir. İzmir örneğinde olduğu gibi, her bölgenin topografik, hidrolojik ve sosyoekonomik özellikleri farklı olduğundan, tek tip çözüm önerilerinden kaçınılmalı; bilimsel veriye dayalı, esnek ve çok ölçekli stratejiler benimsenmelidir.

İklim değişikliğinin geri döndürülemeyen etkilerine karşı zamanında harekete geçmek, yalnızca afet riskini azaltmakla kalmayacak, aynı zamanda toplumların ve ekosistemlerin uzun vadeli dayanıklılığını da güçlendirecektir.

5. Kaynaklar

Dalfes, N., & Avcı, S. (2023). *İstanbul ve İzmir'de deniz seviyesi yükselmesi ve olası etkileri*. Küresel Denge Derneği.

European Marine Observation and Data Network (EMODnet). (2024). (Erişim: 09.05.2025). EMODnet Bathymetry - World Coastline version 2024.

<https://emodnet.ec.europa.eu/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/be8828f0-9390-4e5d-8f30-6831463d4d4b>

European Space Agency. (2024). (Erişim: 13.05.2025). Copernicus Global Digital Elevation Model. OpenTopography. <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>

Harita Genel Müdürlüğü. (2025). (Erişim: 29.05.2025). Türkiye ve çevresi coğrafi ad dizini. <https://www.harita.gov.tr/urun/turkiye-ve-cevresi-coografi-ad-dizini-turkce-pdf/181>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). *Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, R. K. Pachauri & A. Reisinger, Eds.). IPCC.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, R. K. Pachauri & L. A. Meyer, Eds.). IPCC.

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

Meteoroloji Genel Müdürlüğü. (2015). (Erişim: 10.05.2025). Yeni senaryolar ile Türkiye iklim projeksiyonları ve iklim değişikliği. <https://www.mgm.gov.tr/FILES/iklim/iklim-degisikligi-projeksiyon2015.pdf>

Oppenheimer, M., Glavovic, B. C., Hinkel, J., van de Wal, R., Magnan, A. K., Abd-Elgawad, A., Cai, R., Cifuentes-Jara, M., DeConto, R. M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B., Meyssignac, B., & Sebesvari, Z. (2019). Sea level rise and implications for low-lying islands, coasts and communities. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, & N. M. Weyer (Eds.), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (pp. 321–445). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.006>

Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>

Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., Wevers, J., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Lesiv, M., Herold, M., Tsednbazar, N. E., Xu, P., Ramoino, F., & Arino, O. (2022). *ESA WorldCover 10 m 2021 v200* [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221>

