

Türkiye'nin Karadeniz Kıyılarındaki Deniz Seviyesi Trendlerinin Mareograf Verileri ve Grid Altimetre Çözümleriyle Belirlenmesi

(Determination of Sea Level Trends in the Türkiye's Black Sea Coasts from Tide Gauge Stations and Grid Satellite Altimetry Solutions)

Muharrem Hilmi ERKOÇ 

Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
mherkoc@yildiz.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 17.11.2022

Kabul Tarihi (Accepted): 13.01.2023

ÖZ

Birçok insan denize yakın yerleşim alanlarında hayatlarını sürdürmektedir. Kıyı bölgelerdeki yaşamın sürdürülebilirliğini etkileyebilecek en önemli kavramlardan birisi deniz seviyesi olup, küresel ısınmanın etkisiyle giderek yükselen deniz seviyesinin takip edilmesi gereklidir. Bu çalışmada Türkiye'nin Karadeniz kıyılarında yer alan Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) ağı kapsamındaki mareograf istasyonlarında (AMSR, IADA, SILE, SNOP, TRAB) deniz seviyesi trendlerinin belirlenmesi ve Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) tarafından kullanıcılara sunulan grid altimetre çözümleri ile karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bu bağlamda, bu istasyonlar için 2001-2022 zaman aralığındaki mareograf verileri analiz edilerek deniz seviyesi üzerindeki gelgit etkileri giderilmiştir. Grid altimetre verileri sağlayıcı servis tarafından aylık ortalaması mareograf verilerine dinamik atmosfer ve düşey yer kabuğu düzeltmeleri getirilerek birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Düşey yer kabuğu düzeltmesi Harita Genel Müdürlüğü tarafından analiz edilen TUSAGA-Aktif GNSS istasyonlarından ve dinamik atmosferik düzeltme ise Centre national d'études spatiales (CNES) tarafından hazırlanan MOG2D modelinden alınmıştır. Yapılan analizlere göre Türkiye'nin Karadeniz kıyılarındaki mareograf istasyonlarından elde edilen deniz seviyesi trendleri ile grid altimetre çözümlerinden elde edilen deniz seviyesi trendlerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu belirlenmiştir. SILE istasyonu örnek olarak gösterilirse mareograf verilerinden elde edilen deniz seviyesi trendi 4.9 ± 0.7 mm/yıl, grid altimetre çözümünden elde edilen deniz seviyesi trendi ise 4.6 ± 0.8 mm/yıl olarak bulunmuştur. Ayrıca bu istasyondaki mareograf verilerine getirilen dinamik atmosferik düzeltme 0.6 ± 0.2 mm/yıl, düşey yer kabuğu etkisi düzeltmesi ise -0.6 ± 0.1 mm/yıl olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Uydu Altimetresi, Mareograf, Deniz Seviyesi, Gelgit, Karadeniz.

ABSTRACT

Most people live in coastal areas. Hence, coasts are important regions for sustaining habitats and living beings. Sea level is one of the most important causes that affect the sustainability of life in coastal areas. Therefore, the sea level should constantly be monitored to examine whether there is an increase due to global

warming. In this sense, this study aims to determine the sea level trends at tide gauge stations of Turkish National Sea Level Monitoring System (TUDES) network located along the Black Sea coast of Türkiye and to compare them with the grid satellite altimetry solutions published by the Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS). Accordingly, tide gauge data of the stations located in the Black Sea (AMSR, IADA, SILE, SNOP, TRAB) between 2001-2022 were analyzed and tide effects on sea level were removed. Since the grid altimetry data is provided monthly by the provider service, the monthly averaged tide gauge data were compared with each other by applying dynamic atmosphere and vertical crustal corrections. The vertical land motion correction was calculated using the TNPNGN (Turkish National Permanent GNSS Network)-Active GNSS stations analyzed by the General Directorate of Mapping and the dynamic atmospheric correction was taken from the MOG2D model prepared by the Centre national d'études spatiales (CNES). The analyzes showed that the sea level trends obtained from the tide gauge stations on the Black Sea coast of Türkiye and the sea level trends obtained from the grid altimetry solutions were quite compatible with each other. For example, the trend obtained from tide gauge data at the SILE tide gauge was 4.9 ± 0.7 mm/year, and the sea level trend obtained from the grid altimetry solution was found to be 4.6 ± 0.8 mm/year. In addition, at tide gauge station dynamic atmospheric correction and vertical land motion effect correction for tide gauge data were 0.6 ± 0.2 mm/year -0.6 ± 0.1 mm/year respectively.

Keywords: Satellite Altimetry, Tide Gage, Sea Level, Tides, Black Sea.

1. GİRİŞ

Denize kıyısı olan şehirler dünya nüfusunun yüzde atmışının barınma ve yaşam alanlarıdır (IPCC, 2014). Bu nedenle, kıyı bölgelerini etkileyebilecek deniz seviyesi değişimlerinin izlenmesi gereklidir. Küresel deniz seviyesi değişimlerinin ana nedenleri buzulların erimesi ve suyun termal genişmesi iken bölgesel deniz seviyesi değişimlerinin en önemli nedenleri tektonik hareketler, gelgitler ve rotasyonel etkiler (su döngüsü ve okyanus akıntıları) olarak sıralanabilir (Levitus ve diğerleri, 2012; Mohamed ve Skliris, 2021; Erkoç ve diğerleri, 2022). Deniz

seviyesi ve değişimlerin belirlenmesi yersel yöntemler ve uydu tekniklerine dayanmaktadır. Yersel teknikler ile yapılan deniz seviyesi gözlemleri günümüzde modern radar/akustik mareograflar ile yapılmaktadır. 1993 yılında işletmeye alınan TOPEX/POSEIDON uydusu ile deniz seviyesi gözlemlerinde uydu altimetresi ölçmeleri ikinci yöntem olarak ortaya çıkmıştır. TOPEX/POSEIDON; daha önceki uydu altimetresi misyonlarından farklı olarak okyanus sirkülasyonu, okyanus gelgiti gibi kavramların belirlenmesinde kullanılmaya başlanmış, artan doğruluğu ile bir mihenk taşı olmuş ve kıyı altimetresi yaklaşımına öncülük edecek kıyıya yakın hata filtreleme vb. özelliklerle donatılmıştır (Cazenave ve diğerleri, 2014; Xu ve diğerleri, 2019). Eğer bir bölgenin jeolojik değişimleri açısından deniz seviyesi incelenecek ise jeoklim yaklaşımı ile çok uzun dönemli değişimler belirlenebilmektedir (Erkoç ve Doğan, 2022).

Dünya, ay, güneş ve gezegenler arasındaki çekim kuvveti deniz seviyesini etkiler ve bu etki gelgit olarak bilinir. Deniz seviyesi hangi yöntemle belirlenirse belirlensin deniz seviyesi gözlemleri üzerindeki gelgit etkileri çalışmanın amacına göre giderilir (Agnew, 2007). Gelgit modellerinin oluşturulmasında zamana (Harmonic tidal analysis methods based on time: HMB) ve frekans alanına (Harmonic analysis in the frequency domain: HMF) dayalı iki harmonik gelgit analizi yöntemi olarak kullanılmaktadır. N gibi bir sonlu sayı ile ifade edilebilen ve zamana bağlı değerlendirilen gelgitin harmonik bileşenlerinin bulunması HMB yöntemi olarak isimlendirilir (Godin, 1972; Bell ve diğerleri, 1999). Doodson (1921) tarafından önerilen ve deniz seviyesi gözlemlerinde harmonik etki ve gürültünün birlikte değerlendirildiği stokastik modelin kurulması ise HMF yöntemi olarak adlandırılır.

Gelgitler bölgesel olarak deniz seviyesini önemli derecede etkiledikleri için araştırmacılar gelgit etkilerini modelleyerek gelgitlerin kıyı bölgeleri nasıl etkilediği üzerine çeşitli çalışmalar yapmıştır. Alpar ve diğerleri (2000) yaptıkları çalışmada Türkiye'yi çevreleyen denizlerdeki mareograflardan elde edilen saatlik veriler üzerinde bir 119 parametrelilik gelgit modeli oluşturmuş ve bu etkileri gidererek günlük deniz seviyesi değerlerini hesaplamıştır. Basra Körfezi ve Umman Denizi'ni kapsayan bölgede Sultanpour ve diğerleri (2017) uydu altimetresi ve mareograf verilerini kullanarak TRM-IR01 ismini verdikleri gelgit modeli oluşturmuşlardır. Erkoç ve Doğan (2022) ise yaptıkları çalışmada Türkiye'nin Batı ve Güney kıyılarındaki 10 mareograf istasyonunun verileri ile uydu altimetresi

verilerinden faydalanarak 21 parametrelilik gelgit modeli oluşturmuş ve global/bölgesel modellerle karşılaştırmıştır.

Bağıl deniz seviyesi gözlemleri yapılan mareograf istasyonlarında karada sabit bir nokta referans alınır. Bu sebeple mareograf istasyonları düşey hareketlerden etkilenir. Uydu altimetresi ise yer merkezli bir referansa göre mutlak deniz seviyesini değişimlerini belirler ve düşey yer kabuğu hareketlerinden etkilenmez (Wöppelmann ve Marcos, 2012). Düşey yer kabuğu hareketlerinin izlenmesinde küresel konumlama sistemleri (GNSS) sıklıkla kullanılmaktadır (Wöppelmann ve Marcos, 2016). Bununla birlikte son yıllardaki teknolojik gelişmelerle uzaktan algılamada kullanılan interferometrik yapay açıklıklı radar (InSAR), GNSS'nin nokta bazlı çözümünün yanında bölgesel olarak düşey yer kabuğunu belirlemede önemli katkılar sunmuştur (Wöppelmann ve Marcos, 2016; Erkoç ve diğerleri, 2022).

Düşey yer kabuğu hareketi etkisini belirlemek için Wöppelmann ve Marcos (2016), GNSS ile kuzey yarım küredeki mareograf istasyonlarındaki düşey yer kabuğu etkisini 2.0 mm/yıl, güney yarım kürede ise 1.1 mm/yıl olarak belirlemiştir. Grgic ve diğerleri (2020) ise yaptığı çalışmada Hırvatistan'ın Dubrovnik şehrinde yer alan mareograf istasyonunda Uydu altimetresi – Mareograf verilerinden, GNSS'ten ve InSAR'dan elde ettiği düşey yer kabuğu etkisini sırasıyla -1.93 ± 0.38 mm/yıl, -2.04 ± 0.22 mm/yıl ve -2.24 ± 0.46 mm/yıl olarak hesaplamıştır. Avşar ve Kutoğlu (2020) Karadeniz kıyılarındaki 12 mareograf istasyonunda deniz seviyesi trendlerini ve düşey yer kabuğu hareketlerini belirlemiş ayrıca yapılan çalışmalar ile karşılaştırmıştır.

Grid olarak kullanıcıya sunulan uydu altimetresi verileri ham altimetre verilerine getirilen düzeltmelerin sağlayıcı bir servis tarafından yapıldığı verilerdir. Bu sayede uydu altimetresi verilerinin işlenmesindeki olası matematiksel model hataları veya düzeltmelerden kaynaklanan etkilerin minimize edilmesi sağlanır. Ayrıca matematiksel olarak karmaşık ve uzun zaman gerektiren işlemlerden kaçınılmış olunur. Grid veriler birçok kalite kontrol aşamalarından geçmekte ve farklı metodlar ile karşılaştırıldıktan sonra kullanıcıya sunulmaktadır. Son yıllarda CNES tarafından organize edilen Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic (AVISO) organizasyonu tarafından sağlanan X-TRACK (kıyı altimetresi yaklaşımı ile hazırlanmış veri) ve Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)

tarafından sağlanan 4. seviye (L4) grid veriler kullanıcılara ilgili mareograf istasyonlarına en yakın bölgedeki işlenmiş ve analize hazır grid verileri sunmaktadır. Son yıllarda grid altimetre verileri kullanılarak yapılan çalışmaların sayısı artmaktadır. Yıldız ve diğerleri (2013) tarafından yapılan çalışmada 1993-2009 yılları arasında Türkiye'nin güneybatı kıyılarındaki bazı mareograf istasyonlarında LEGOS/CTOH tarafından sağlanan grid verilerden düşey yerkabuğu hareketlerini belirlemiştir. Mohamed ve diğerleri (2019) yaptığı çalışmada son 25 yılda Akdeniz'de deniz seviyesi ve deniz yüzeyi sıcaklığının trendlerinin belirlenebilmesi için CMEMS tarafından sağlanan L4 grid altimetre verilerini kullanmıştır. Erkoç ve diğerleri (2022) ise yaptığı çalışmada Ege, Akdeniz ve Marmara bölgesinde yer alan mareograf istasyonlarındaki deniz seviyesi değişimlerini mareograf istasyon verilerinin yanı sıra XTRACK ve CMEMS grid altimetre verilerini kullanarak belirlemiş ve birbirleri ile karşılaştırmıştır.

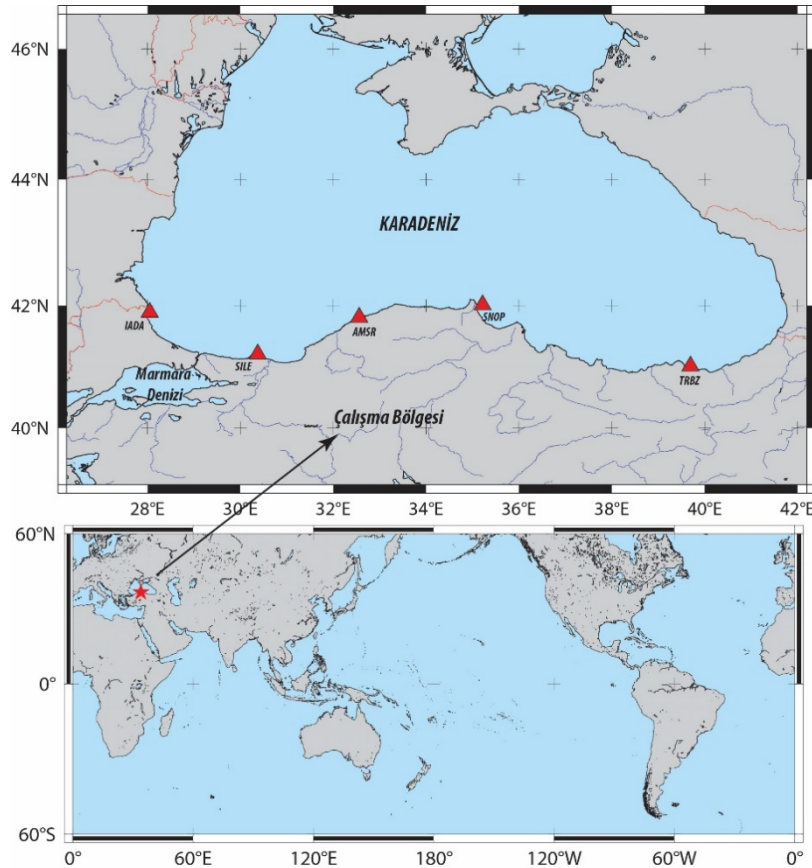
Bu çalışmada Türkiye'nin Karadeniz kıyılarındaki yer alan mareograf istasyonlarındaki deniz seviyesi trendleri ile CMEMS tarafından sağlanan L4 grid altimetre verilerinden elde edilen deniz seviyesi trendlerinin karşılaştırılması

hedeflenmiştir. Bu amaçla 2001-2022 arasında ve mareograf istasyonunun kurulum tarihine göre değişen bir zamansal aralıktaki Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) kapsamında işletilen mareograf istasyonlarına ait verilerden önce gelgit parametreleri ve ardından deniz seviyesi trendleri belirlenmiştir. Mareograf istasyonlarına ait verilere dinamik atmosferik düzeltme (Dinamic Atmospheric Correction: DAC) ve düşey yerkabuğu düzeltmeleri getirilmiş ve elde edilen sonuçlar bu istasyonlarda, L4 grid altimetre verilerinden kestirilen deniz seviyesi trendleri ile karşılaştırılmıştır.

2. METOT VE VERİLER

a. Çalışma Bölgesi

Karadeniz; doğudan batıya uzunluğu 1175 km, maksimum derinliği 2200 metre olan, yaklaşık 8350 km kıyı şeridine sahip yarı-kapalı bir denizdir. Karadeniz kıyılarındaki Permanent Service for Mean Sea Level (PSMSL) veri merkezi tarafından kullanıcılara sunulan 7 ve TUDES kapsamında işletilen 5 mareograf istasyon vardır (Şekil 1). Ayrıca Karadeniz'de Topex/Poseidon, Jason1-2 ve 3 uyduları dikkate alındığında toplam 10 uydu altimetre geçişi vardır.



Şekil 1. Çalışma Bölgesi.

b. Mareograf Verileri ve Analizi

Mareograf istasyonları üç asırdan fazla süredir deniz seviyesi gözlemlerinin yapılması için kullanılmaktadır. Başlangıçta miraya benzeyen bir düşey cetvel görüntüsündeki baremler yardımı ile insan gücü kullanılarak yapılan gözlemler zamanla yerini şamandıralı sistemlere günümüzde ise modern mareograf istasyonlarına bırakmıştır (Şekil 2). Modern mareograf istasyonları akustik veya radar sensörlü sistemlere sahiptir ve bu istasyonlarda deniz seviyesi gözlemlerinin yanında deniz seviyesini etkileyebilecek sıcaklık, hava basıncı, rüzgâr hızı ve yönü, nem gibi meteorolojik gözlemler de yapılabilmektedir.



Şekil 2. Modern Mareograf istasyonu (ŞİLE)

Mareograf istasyonu verileri dünya genelinde PSMSL gibi küresel veri sağlayıcılardan temin edilebilmektedir. PSMSL gelgit etkilerinden arındırılmış aylık ve yıllık ortalama deniz seviye değerlerini kullanıcılara sunmaktadır. Fakat TUDES gibi bölgesel veri sağlayıcı kuruluşlar, mareograf istasyonlarında genellikle 1, 5, 15 veya 60 dakikalık gözlemler yapar ve kullanıcılara sunar. Bu şekilde yayınlanan veriler gelgit, atmosferik ve düşey yerkabuğu gibi etkileri içinde barındırır. Öncelikle bu veriler üzerindeki gelgit etkileri giderilerek günlük veriler ve günlük verilerin aritmetik ortalamasından ise aylık ortalama deniz seviyesi değerleri hesaplanmalıdır. Gelgit bileşenlerinin hesaplanmasında (1) eşitliğinden faydalanılabilir (Parker, 2018).

$$h(t) = H_0 + \sum_{i=1}^k A_i \cos \omega_i t + B_i \sin \omega_i t \quad (1)$$

Burada $h(t)$ yerel datuma ait referans yüzeyden olan anlık deniz seviyesi, H_0 ortalama deniz seviyesi, t zaman, ω_i açısal frekans, A_i ve B_i Fourier katsayılarını ifade etmektedir. Ortalama deniz seviyesi ve gelgit parametrelerinin kestirilmesi için fonksiyonel olarak en küçük kareler yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır ve (2) eşitliği ile ifade edilebilir.

$$v = Ax - l$$

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \cos \omega_1 t_1 & \sin \omega_1 t_1 & \cdots & \cos \omega_m t_1 & \sin \omega_m t_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos \omega_1 t_n & \sin \omega_1 t_n & \cdots & \cos \omega_m t_n & \sin \omega_m t_n \end{bmatrix} x$$

$$= x \begin{bmatrix} H_0 \\ A_1 \\ B_1 \\ \vdots \\ A_m \\ B_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

Burada l ölçü vektörü, A katsayılar matrisi, x bilinmeyenler vektörü, v düzeltmeler vektörüdür. σ_0^2 öncül varyans, P ağırlık matrisi, n ölçü sayısı, u bilinmeyen sayısı m ise kestirilecek gelgit bileşeni sayısını ifade etmektedir. Eşitlik (2)'de gösterilen düzeltme denklem sistemi en küçük kareler ilkesi ile çözümlenir, oluşan normal denklemlerden elde edilen değerler Eşitlik (3)'te yerine yazılırsa gelgit bileşenleri elde edilir.

$$x = (A^T P A)^{-1} (A^T P l) \quad (3)$$

Buradan bilinmeyenlerin varyans-kovaryans matrisi K_{xx} ve birim ağırlıklı varyansın soncul değeri m_0^2 Eşitlik (4) ile elde edilir.

$$K_{xx} = (S_0^2) (A^T P A)^{-1} \quad (4)$$

$$m_0^2 = (l^T P l - A^T P l x) / (n - m)$$

Kestirilen gelgit bileşenlerinin genlik (R_i) ve faz (ϕ_i) değerleri (5) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$R_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2} \quad (5)$$

$$\phi_i = \arctan\left(\frac{B_i}{A_i}\right), \quad \phi_i = 2 \arctan\left(\frac{B_i}{A_i + R_i}\right)$$

Bu çalışmada TUDES kapsamında yer alan ve Şekil 1 de gösterilen mareograf istasyonlarına ait gözlemlerinden faydalanılmıştır. Verilere ilişkin bilgiler Tablo 1 ile gösterilmiştir.

Mareograf istasyonlarında bir gün içinde gözlem süresine bağlı olarak genellikle 24 ila 1440 veri kaydı gerçekleştirilir. Bu sebeple verilerin kalite kontrolünün yapılması oldukça önemlidir. Bunun içinde zaman serisi dikkatle kontrol edilip uyumsuz ölçülerin ayıklanması gerekmektedir. Bu çalışmada uyumsuz ölçülerin ayıklanması için Gauss dağılım fonksiyonu (3-sigma) kullanılmıştır (Lehmann, 2013; Soltanpour ve diğerleri, 2017). Bu işlemin ardından gelgit parametrelerini belirlemek için Doodson (1921) tarafından önerilen model kullanılmıştır (Doodson, 1921). 68 parametrelili bir gelgit modeli oluşturulmuş ve hesaplanmıştır. Bu 68 parametreden gözlemleri en çok etkileyen 21 parametre Tablo 2 ile gösterilmiştir. Bunlar günlük (K2, M2, N2, Ma2, R2, S2, T2, J1, K1, M1, O1, Oo1, Ms4), 15 günlük (Mf, Msf), aylık (Mm) altı aylık (Ssa) ve yıllık (Sa) gelgit parametrelerinden oluşmaktadır. Şekil 3a'da örnek olarak IADA

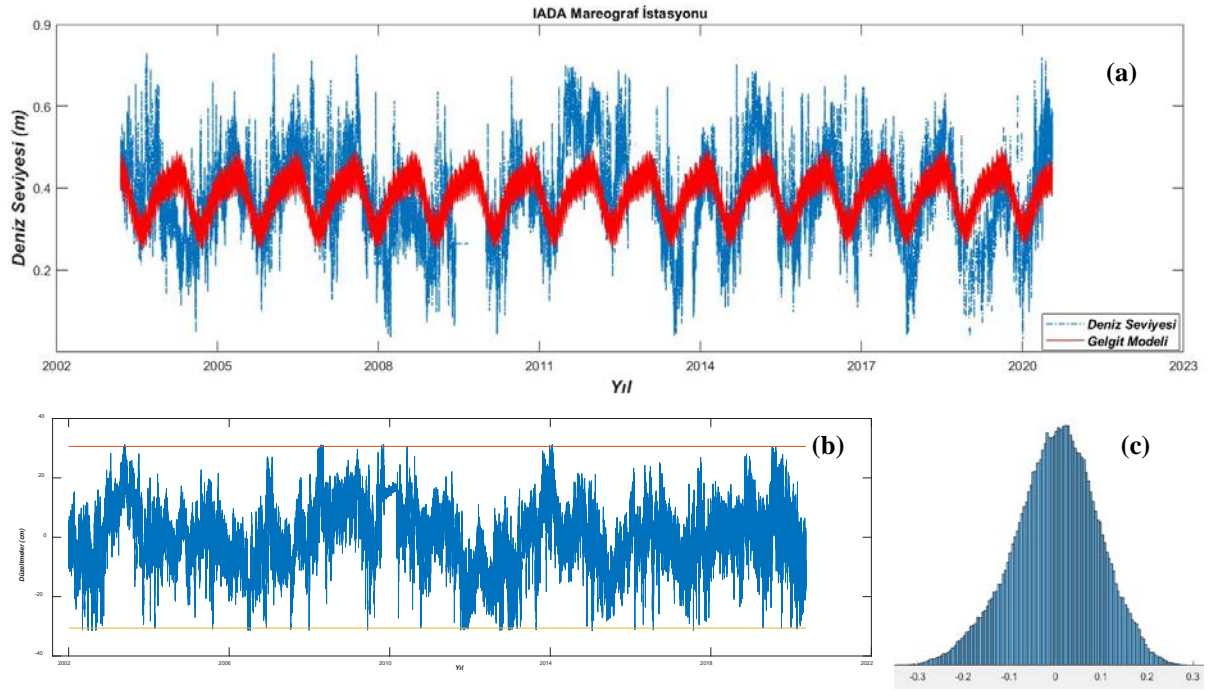
Mareograf istasyonuna ilişkin 15 dakikalık deniz seviyesi gözlemleri (mavi çizgi), 68 parametrelili gelgit modeli (kırmızı çizgi) gösterilmiştir. Şekil 3b dengeleme sonucu oluşan düzeltmeleri (gelgit etkileri) ve Şekil 3c ise histogramı göstermektedir. IADA Mareograf istasyonunda kestirilen ana gelgit parametreleri, yıllık ve yarıyıllık gelgitten oluşan genlik bu istasyonda 68 parametreden oluşan modelin tüm parametrelerinden gelen genliğin %98.5'ini oluşturmaktadır. Ana gelgit parametreleri ile yıllık ve yarıyıllık gelgit parametrelerinin bileşenleri Tablo 3'de gösterilmiştir. Diğer dört mareograf istasyonunda da benzer yaklaşımla işlemler yapılarak gelgit modeli oluşturulmuş ve deniz seviyesi üzerindeki etkileri giderilmiştir. Tüm mareograf istasyonlarındaki ana gelgit parametreleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Ana gelgit parametreleri TRAB ve IADA mareograf istasyonlarında diğer istasyonlara göre daha büyük olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Mareograf verileri.

Mareograf	Konum		15 Dakikalık Veri		
	Enlem	Boylam	Başlangıç	Bitiş	Veri Servisi
AMSR	41.743988	32.390329	2001	2022	TUDES
IADA	41.888904	28.023515	2002	2022	TUDES
SILE	41.176364	29.605375	2008	2022	TUDES
SNOP	42.023068	35.149458	2005	2016	TUDES
TRAB	41.001978	39.744549	2002	2022	TUDES

Tablo 2. Önemli gelgit parametreleri ve periyotları.

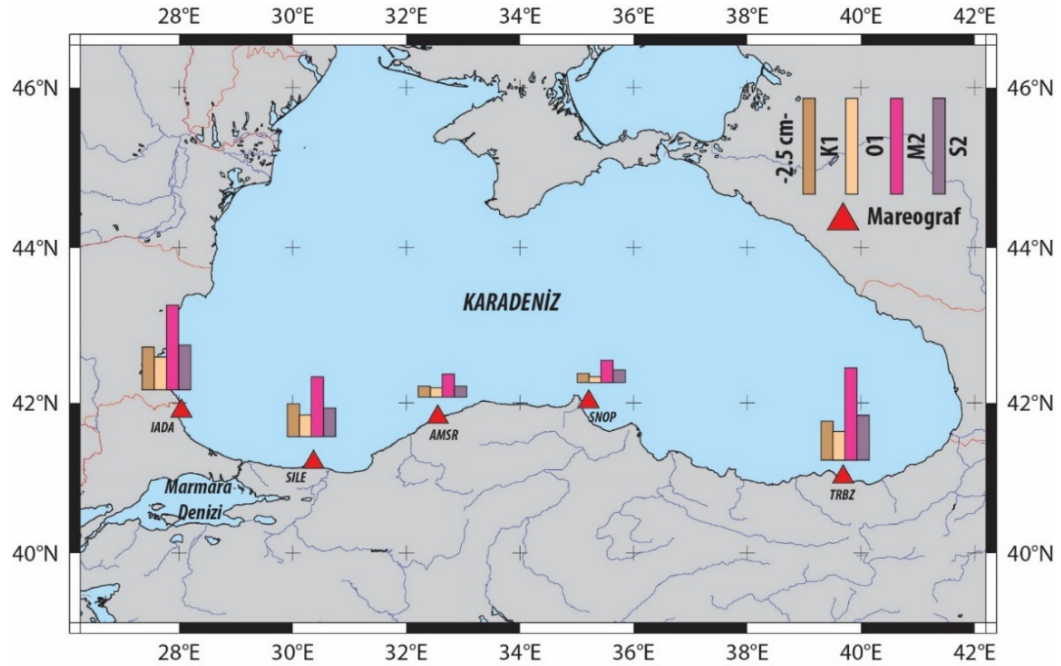
Parametre	Periyot (Gün)	Parametre	Periyot (Gün)
K2	0.498634738	P1	1.002745517
M2	0.517524947	Q1	1.119514937
N2	0.527431168	S1	1
Ma2	0.516792787	Mf	13.66082894
R2	0.499316491	Mm	27.55428194
S2	0.5	Msf	14.76537814
T2	0.500685383	Oo1	0.929419758
J1	0.962436532	Ssa	182.6150475
K1	0.997269476	Ms4	0.254305803
M1	1.035050102	Sa	365.230095
O1	1.075805563		



Şekil 3. IADA mareograf istasyonu zaman serisi (a), düzeltmeler (b) ve histogram (c).

Tablo 3. Bazı Gelgit bileşenleri (IADA mareograf istasyonu).

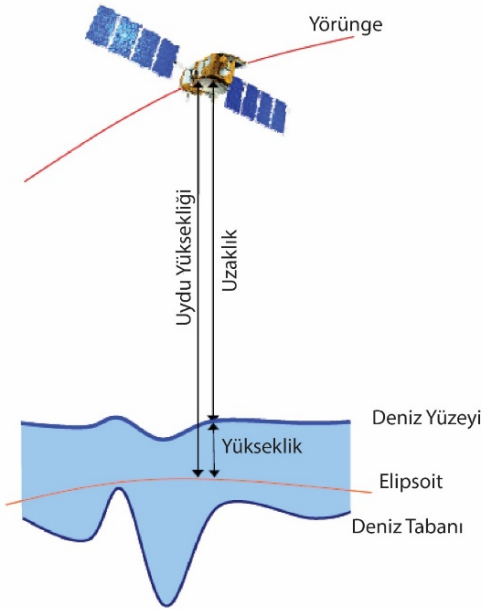
Parametre	Genlik (cm)	Std. Sapma	Faz (derece)	Std. Sapma	Yüzde
Sa	6.43	0.27	136	2.45	76
Ssa	2.02	0.25	253	7.18	8
K1	1.10	0.14	67.4	1.01	2
O1	0.84	0.10	63.6	1.15	2
M2	2.19	0.22	13.6	0.93	9
S2	1.04	0.13	20.5	0.81	1



Şekil 4. Ana gelgit parametreleri

c. Uydu Altimetresi Verileri ve Analizi

Uydu altimetresinde temel prensip ile okyanus, deniz, göl, nehir gibi alanlarda uydudan gönderilen radar sinyalinin gidiş-dönüş süresinin ölçülerek su seviyesinin araştırılmasıdır. İlk olarak 1969 yılında kullanılmaya başlanan uydu altimetresi ölçmeleri, 1993 yılında hizmete alınan Topex/Poseidon'un önceki misyonlara göre daha modern, gelişmiş, hassas ve kıyıya özel özellikler içermesiyle ile uydu altimetresi deniz seviyesinin belirlenmesinde ikincil yöntem olarak karşımıza çıkmıştır. Altimetre uyduları ile hedef bölgelerdeki alanlar (deniz/göller/nehirler) birkaç gün/hafta tekrar geçiş süresine göre gözlemlenir. Ayrıca altimetre misyonları yer merkezli bir referans sisteme göre deniz seviyesi gözlemlerini gerçekleştirdiği için düşey yerkabuğu hareketinden etkilenmez.



Şekil 5. Uydu altimetresi ölçüm prensibi

Uydu altimetresi için temel hedef anlık deniz seviyesinin belirlenmesidir. Bunun için uydu yüksekliğinden uzaklık değeri çıkarılmalıdır (Şekil 5). Uzaklık belirlenirken jeofiziksel ve uzaklık ölçmeye yarayan donanımdan kaynaklı bazı etkilere maruz kalır. Bunlar; uydu altimetresi ölçüm hataları, uydu konum hataları, jeofiziksel hatalar, sinyal yayılım hataları olarak ifade edilebilir.

$$SSH = Alt - S_{cor} \quad (6)$$

Bağlantıda SSH anlık deniz seviyesi değerini, Alt uydu yüksekliğini, S_{cor} düzeltilmiş uzaklık değerini göstermektedir. S_{cor} bağlantı (7) ile belirlenmektedir.

$$S_{cor} = S + (h_i + h_{iono} + h_{dry} + h_{wet} + h_{SSB} + h_{otide} + h_{ol} + h_{stide} + h_{ptide} + h_{DAC}) \quad (7)$$

Bağlantı (7)'de S uydu altimetresi ile deniz yüzeyi arasındaki ham uzaklıktır. h_i aletsel hataları, h_{iono} iyonosferik etkiyi, h_{dry} kuru troposferik etkiyi, h_{wet} ıslak iyonosferik etkiyi, h_{SSB} deniz durumu yanılmasını, h_{otide} okyanus gelgitini, h_{ol} okyanus yüklenmesini, h_{stide} katı dünya gelgitini, h_{ptide} kutup gelgitini, h_{DAC} ise dinamik atmosferik etkiyi ifade eder.

Bu çalışmada uydu altimetresi verileri grid çözüm sunan CMEMS arşivinden edinilmiştir (CMEMS, 2022). Şekil 6'da gösterilen arayüzde yer alan her bir grid değeri $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ olarak kullanıcıya sunulmaktadır. Mareografa en yakın grid verisinin alınması yaygın olarak kullanılan yaklaşımdır. Bu çalışmada mareograf istasyonlarına en yakın grid değerler kullanılmıştır ve grid değerler ile mareograf istasyonları arası mesafe 3 km'den daha azdır.



Şekil 6. CMEMS Grid data arayüzü

Bağlantı (6) ve (7) kullanılarak CMEMS tarafından hazırlanan L4 grid veriler Tablo 4'de gösterilen düzeltmeleri içermektedir. Grid veri kullanımı kullanıcıların bu işlem yükünden ve olası hatalardan kaçınmalarını sağlar.

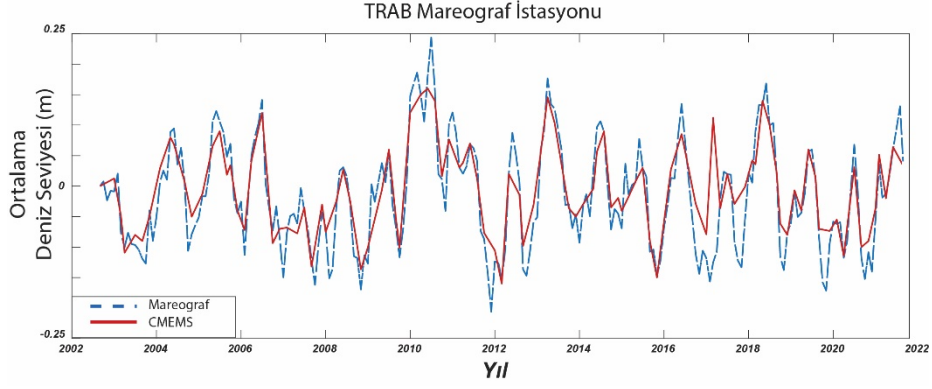
Tablo 4. Grid altimetre verilerine getirilmiş düzeltmeler.

Düzeltilmeler	T/P	Jason-1 ve 2	Envisat	GFO	SARAL/Altika
İyonosfer	Çift frekanslı altimetre aralığı ölçümleri ve GCP (GDR Düzeltmesi)	Çift frekanslı altimetre aralığı ölçümleri	GIM model		
Kuru Troposfer	ECMWF model		NCEP	ECMWF	
Islak Troposfer	Radyometre, radyometre kaymasının GCP düzeltmesi ve sapma etkilerinin GCP ile düzeltmesi	Gelişmiş radyometre düzeltmesi	model	Radyometre	
Deniz Durumu Yanılması	Parametrik olmayan deneysel model		Önemli dalga yüksekliğinin %4,5'i	Parametrik olmayan deneysel model	
Katı Gelgit	Gelgit potansiyeli modeli				
Kutup Gelgiti	Wahr, 1985				
Yükleme	FES1999 (Lefevre ve diğerleri, 2002)				
Dinamik Atmosferik Düzeltme	MOD2D (Carrere ve Lyard, 2003) ve ECMWF'den türetilen 20 günden daha uzun süreler için ters barometre etkisi				
Okyanus Gelgiti	FES 2014 (Carrere ve diğerleri, 2016)				

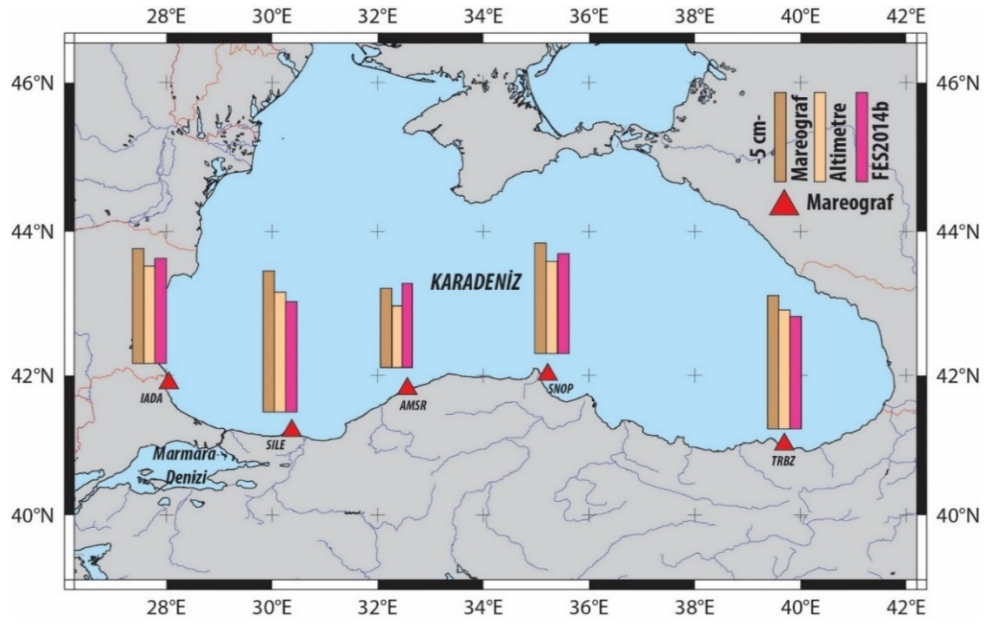
3. BULGULAR

Deniz seviyesi trendlerinin belirlenmesi için Türkiye'nin Karadeniz kıyılarında yer alan beş mareograf istasyonuna ilişkin yüksek frekanslı (15 dakikalık) veriler analiz edilmiş; gelgit etkileri giderilerek günlük deniz seviyesi verileri, bu verilerin aritmetik ortalaması alınarak aylık ortalama deniz seviyesi değerleri hesaplanmıştır. Ayrıca bu mareograf istasyonlarına en yakın gridlerdeki aylık altimetre verileri CMEMS veri arşivinden alınmıştır. Örnek olarak TRAB mareograf istasyonuna ait mareograf verilerinden elde edilen aylık ortalama deniz seviyesi verileri ile en yakın grid değerden alınan aylık ortalama deniz seviyesi Şekil 7'de gösterilmiştir. 2008-2012 yılları arasında Karadeniz'deki mareograf istasyonlarında ölçülen deniz seviyesinde her iki yöntem ile de belirgin olarak önce artış ve sonrasında düşüş göstermektedir. Literatürde bu tarz belirgin değişimlerin ay düğümü ve güneş yerberi dönemlerine denk gelmesinden kaynaklandığı ve güneş patlamalarının bir sonucu

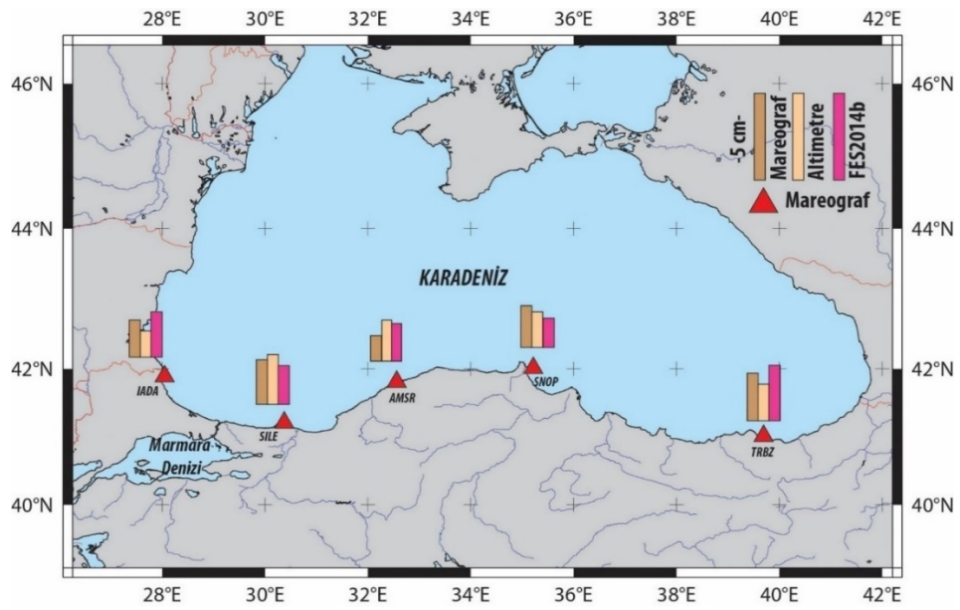
olabileceğine dair yayınlar vardır (Perry, 2007). Çalışmada, grid verileri ile yıllık ve yarıyılık etki belirlenmiş, mareograf verileri ile gelgit modeli oluşturulmuştur. Bu bağlamda; yıllık gelgit bileşeni en büyük SILE mareograf istasyonunda (mareograf :7.98 ± 0.30 cm, grid veri: 7.50 ± 0.70 cm) hesaplanmıştır. Aynı bölgede FES2014 modelinden elde edilen gelgit bileşeni ise 6.87 ± 0.42 cm olarak yayınlanmıştır. Tüm mareograf istasyonlarına ilişkin yıllık gelgit bileşeni Şekil 8'de gösterilmiştir. Yarıyılık gelgit parametreleri ise Şekil 9'da gösterilmiştir. Mareograf ve grid uydu altimetresi verilerinden elde edilen sonuçların birbirleri ile ve FES2014b küresel gelgit modeli ile uyumlu oldukları görülmektedir (Carrere ve diğerleri, 2016). Beşel ve Kayıkçı (2022) tarafından yapılan çalışmada TRAB mareograf istasyonunda mareograf ve GNSS İnterferometrik Reflektometri (GNSS Interferometric Reflectometry : GNSS-IR) ile ana gelgit parametrelerini belirlemiş; K1, O1, M2 ve S2 parametreleri mareograf verilerinden kestirilmiştir.



Şekil 7. TRAB mareograf istasyonunda aylık ortalama deniz seviyesi.



Şekil 8. Yıllık gelgit bileşeni.



Şekil 9. Yarıyıllık gelgit bileşeni.

Medvedev (2018) ise yaptığı çalışmada Karadeniz kıyılarındaki mareograf istasyonlarındaki gelgit parametrelerini belirlemiştir. Bu çalışmada elde edilen değerler ile Medvedev (2018)'de kestirilen değerler oldukça uyumludur. Örneğin; Medvedev (2018) TRAB mareograf istasyonunda K1, O1, M2 ve S2 değerlerini sırasıyla 0.93, 0.65, 2.27 ve 1.06 cm olarak hesaplamıştır.

Gelgit etkileri giderildikten sonra belirlenen aylık ortalama deniz seviyesi değerleri kullanılarak en küçük kareler yaklaşımı benimsenmiş ve analizler bu yaklaşıma göre gerçekleştirilmiştir. Bağlantı (8)'de aylık ortalama deniz seviyesi y_i , desimal yıl cinsinden zaman bilgisi t_i , ortalama deniz seviyesi ise r_i ile gösterilmiştir. b ise ana hedef olan deniz seviyesi trendini ifade eder.

$$y_i = b t_i + r_i \quad (8)$$

Mareograf istasyonları yerel referansa göre gözlem yaptığı için düşey yerkabuğu hareketlerinden (Vertical land motion: VLM) etkilenmektedir. Bu etkinin matematiksel olarak ifadesi bağlantı (9)'deki gibidir (Wöppelmann ve Macros, 2016; Girgic ve diğerleri, 2020; Erkoç ve diğerleri, 2022).

$$VLM = b_{grid} - b_{mar} \quad (9)$$

Burada VLM düşey yerkabuğu hareketini, b_{grid} grid altimetre verisinden elde edilen trendi ve b_{mar} ise mareograf istasyonundan elde edilen deniz seviyesi trendini ifade eder.

Mareograf istasyonlarına ilişkin verilere düşey yerkabuğu hareketleri düzeltmesi yaygın olarak GNSS ve son yıllarda InSAR çözümleri ile gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada düşey yer kabuğu hareketleri düzeltmesi için Harita Genel Müdürlüğü tarafından sunulan TUSAGA-Aktif GNSS istasyonları çözümlerinden faydalanılmıştır (mareograf-GNSS istasyonları arası mesafe 5 km'den azdır). Ayrıca altimetre verileri dinamik atmosferik düzeltme içerdiği için trendlerin her iki yöntem ile karşılaştırılabilmesi adına bu düzeltmenin mareograf istasyonlarına da getirilmesi gerekir. Dinamik atmosferik düzeltme için Fransız Uzay Ajansı tarafından sunulan MOG2D modeli kullanılmıştır (Carrere ve Lyard, 2003).

Tablo 5 Mareograf istasyonlarından elde edilen deniz seviyesi trendlerini, en yakın GNSS istasyonlarından elde edilen düşey yer kabuğu etkisini, MOG2D modelinden alınan dinamik atmosferik düzeltmeyi ve mareograf istasyonlarına en yakın grid altimetre verilerinden elde edilen deniz seviyesi trendlerini göstermektedir. Teorik olarak mareograf istasyonlarından elde edilen deniz seviyesi trendleri ile DAC ve VLM düzeltmelerinin toplamı grid altimetre verilerinden elde edilen deniz seviyesi trendini vermelidir. Çalışmada AMSR ve IADA istasyonlarına yakın TUSAGA-Aktif GNSS istasyonu bulunmadığı için bu istasyonlara VLM düzeltmesi getirilememiştir. Diğer mareograf istasyonlarına bakıldığında iki yöntemle de elde edilen deniz seviyesi trendlerinin birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmektedir. Ayrıca Karadeniz'de daha önce Avşar ve Kutoğlu (2020) tarafından yapılan çalışmada belirlenen deniz seviyesi trendlerine bakıldığında SNOP ve SILE istasyonları ile uyumlu diğer istasyonlarda ise verilerdeki zamansal aralığın aynı olmamasından kaynaklı olduğu düşünülen farklı sonuçlar belirlenmiştir.

Tablo 5. Deniz Seviyesi trendleri.

İstasyon	Trend (Mareograf) (mm/yıl)	DAC (mm/yıl)	VLM _{GNSS} (mm/yıl)	Trend (Grid Altimetre) (mm/yıl)
AMSR	2.4 ± 0.5	0.6 ± 0.2	-	2.0 ± 0.8
IADA	1.5 ± 0.8	0.6 ± 0.3	-	1.9 ± 0.6
SILE	4.9 ± 0.7	0.6 ± 0.2	-0.7 ± 0.1	4.6 ± 0.8
SNOP	0.8 ± 0.4	0.6 ± 0.2	-1.6 ± 0.1	1.0 ± 0.5
TRAB	1.0 ± 0.7	0.6 ± 0.2	-0.6 ± 0.1	1.2 ± 0.8


4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Türkiye'nin Karadeniz kıyılarındaki beş mareograf istasyonundaki deniz seviyesi trendlerinin belirlenmesi ve grid altimetre verilerinden elde edilen trendler ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda öncelikle deniz seviyesi verileri ile bölgesel gelgit modeli oluşturularak deniz seviyesi verileri gelgit bileşenleri etkilerinden arındırılmıştır. Deniz seviyesi üzerindeki gelgit etkileri kaldırıldıktan sonra mareograflardaki aylık ortalama deniz seviyeleri ve bu değerlerden deniz seviyesi trendleri belirlenmiştir. Mareograflardan elde edilen deniz seviyesi trendi SILE istasyonunda en büyük (4.9 ± 0.7 mm/yıl) ve SNOP istasyonunda en küçük (0.8 ± 0.4 mm/yıl) olarak belirlenmiştir. En büyük yarı yıllık genlik TRAB Mareograf istasyonunda ve en büyük yıllık genlik ise SILE istasyonunda belirlenmiştir (her iki yöntem ile). Düşey yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesinde Harita Genel Müdürlüğü tarafından sunulan GNSS çözümlerinden faydalanılmıştır. Harita Genel Müdürlüğü tarafından yayınlanan TUSAGA-Aktif GNSS istasyonları çözümlerine göre ülkemizin Karadeniz kıyılarında çökme eğilimli bir düşey yer kabuğu modeli görülmektedir. Karadeniz kıyıları boyunca ortalama deniz seviyesi yükselmesi mareograf verilerinden 2.1 mm/yıl ve grid altimetre verilerinden 1.9 mm/yıl olarak belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada, mareograf verileri Harita Genel Müdürlüğü TUDES veri arşivinden, grid altimetre verileri CMEMS veri servisinden ve GNSS düşey hız bileşenleri Harita Genel Müdürlüğü çözümlerinden alınmıştır. Yazar veri desteğinden dolayı Harita Genel Müdürlüğü'ne ve Copernicus Marine Service'e teşekkür eder.

ORCID

Muharrem Hilmi ERKOÇ 
<https://orcid.org/0000-0003-4855-0071>

KAYNAKLAR

Agnew, D.C. (2007). *Earth Tides*, In: Schubert G. (ed.) *Geodesy: Treatise on Geophysics*. Elsevier Science, Amsterdam, Netherlands (3):163–195. doi:10.1016/B978-044452748-6.00056-0

Alpar, B., Doğan, E., Yüce, H. ve Altıok, H. (2000). Sea level changes along the Turkish coasts of the Black Sea, the Aegean Sea and the Eastern Mediterranean. *Mediterranean Marine Science*, 1(2000), pp. 141-156. doi:10.12681/mms.285

Avşar, N. B. ve Kutoğlu, Ş. H. (2020). Recent sea level change in the Black Sea from satellite altimetry and tide gauge observations. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(3), 185. doi:10.3390/ijgi9030185

Bell, C., Vassie, J.M. ve Woodworth, P.L. (1999). POL/PSMSL Tidal Software Kit 2000 (TASK-2000), CCMS Proudman Oceanographic Laboratory, Bidston Observatory, Birkenhead, UK, 20. Erişim adresi : https://psmsl.org/train_and_info/software/task_2k.rtf (20.12.2022)

Beşel, C. ve Kayıkçı, E. (2022). Karadeniz kıyısında TUDES ortak yerleşkeli GNSS istasyonu deniz seviyesi gözlemlerinden GNSS-IR tekniği ile gelgit bileşenlerinin belirlenmesi. *Harita Dergisi*, 168, 1-12. Erişim adresi: <https://www.harita.gov.tr/uploads/files/articles/karadeniz-kiyisinda-tudes-ortak-yerleskeli-gnss-istasyonu-deniz-seviyesi-gozlemlerinden-gnss-i-1618.pdf> (20.12.2022)

Carrere, L. ve Lyard F. (2003). Modelling the barotropic response of the global ocean to atmospheric wind and pressure forcing - comparisons with observations, *Geophysical Research Letters*, 30(6), pp 1275. doi:10.1029/2002GL016473

Carrere, L., Lyard, F., Cancet, M., Guillot, A. ve Picot, N. (2016, Mayıs). *FES 2014, a new tidal model - Validation results and perspectives for improvements*. Presentation to ESA Living Planet Conference, Prague, Czecia.

Cazenave, A., Dieng, H.B., Meyssignac, B., von Schuckmann, K., Decharme, B. ve Berthier, E. (2014). The rate of sea-level rise. *Nature Climate Change* 4, pp. 358–361. doi:10.1038/nclimate2159

CMEMS (2022). Global Ocean Gridded L 4 Sea Surface Heights And Derived Variables Reprocessed 1993 Ongoing. Erişim adresi: https://data.marine.copernicus.eu/product/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047/description (23.12.2022)

- Doodson, A.T. (1921). The harmonic development of the tide-generating potential. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* 100(704), pp. 305–329. doi:10.1098/rspa.1921.0088
- Erkoç, M.H., Doğan U., Yıldız H. ve Sezen E. (2022). Estimation of vertical land motion along the south and west coast of Turkey from multi-sensor observations. *Advances in Space Research*, 70 (2022), 1761–1772. doi:10.1016/j.asr.2022.06.022
- Erkoç, M.H. ve Doğan U. (2022). Regional tidal modelling using tide gauges and satellite altimetry data in South-West coast of Turkey. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26, 4052–4061. doi:10.1007/s12205-022-0320-1
- Grgic, M., Bender, J. ve Basic, T. (2020). Estimating vertical land motion from remote sensing and in-situ observations in the Dubrovnik Area (Croatia): A multi-method case study. *Remote Sensing*, 12 (21), 3543. doi:10.3390/rs12213543
- Godin. G. (1972). *The analysis of tides*, University of Toronto Press, Toronto, Canada.
- IPCC WG III. (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of climate change. contribution of working group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Erişim adresi : https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_full.pdf (20.12.2022)
- Lefevre, F., Lyard, F., Le Provost, C. ve Schrama, E. O. (2002). FES99: a global tide finite element solution assimilating tide gauge and altimetric information. *Journal of Atmosphere and Ocean Technology*, 19 (2002), pp. 1345–1356. doi:10.1175/1520-0426(2002)019<1345:FAGTFE>2.0.CO;2
- Lehmann, R. (2013). 3σ -Rule for Outlier Detection from the Viewpoint of Geodetic Adjustment. *Journal of Surveying Engineering*, 139(4), 157–165. doi:10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000112
- Levitus, S., Antonov, J.I., Boyer, T.P., Baranova, O.K., Garcia, H.E., Locarnini, R.A., ... Zweng, M.M. (2012). World ocean heat content and thermosteric sea level change (0–2000 m), 1955–2010. *Geophysical Research Letters*, 39 (10). doi:10.1029/2012GL051106
- Medvedev, I.P. (2018). Tides in the Black Sea: Observations and numerical modelling. *Pure and Applied Geophysics* 175, pp. 1951–1969. doi:10.1007/s00024-018-1878-x
- Mohamed, B., Abdallah, A.M., Alam El-Din, K., Nagy, H. ve Shaltout, M. (2019). Inter-annual variability and trends of sea level and sea surface temperature in the Mediterranean Sea over the Last 25 Years. *Pure and Applied Geophysics*, 176, pp. 3787–3810. doi:10.1007/s00024-019-02156-w.
- Mohamed, B. ve Skliris, N. (2021). Steric and atmospheric contributions to interannual sea level variability in the eastern mediterranean sea over 1993–2019. *Oceanologia*, 64 (1), pp. 50–62. doi:10.1016/j.oceano.2021.09.001
- Parker, B. (2018). *Tides*. In: Finkl, C., Makowski, C. (eds) *Encyclopedia of Coastal Science Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-48657-4_324-2
- Perry C.A. (2007). Evidence for a physical linkage between galactic cosmic rays and regional climate time series. *Advances in Space Research*, 40 (3) (2007), pp. 353–364. doi:10.1016/j.asr.2007.02.079
- Soltanpour, A., Pirooznia, M., Aminjafari, S. ve Zareian, P. (2017) Persian gulf and oman sea tide modeling using satellite altimetry and tide gauge data (TM-IR01). *Marine Georesources & Geotechnology*, 37(6), pp. 1–11. doi:10.1080/1064119x.2017.1366608
- Wahr, J.M. (1985). Deformation induced by polar motion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90, pp. 9363–9368. doi:10.1029/JB090iB11p09363
- Wöppelmann, G. ve Marcos, M. (2012). Coastal sea level rise in southern Europe and the nonclimate contribution of vertical land motion. *Journal of Geophysical Research*, 117(C1), C01007. doi:10.1029/2011JC007469
- Wöppelmann, G. ve Marcos, M. (2016). Vertical land motion as a key to understanding sea level change and variability. *Reviews of Geophysics*, 54 (1), pp. 64–92. doi:10.1002/2015RG000502.

Xu, X., Xu, K., Xu, Y. ve Shi, L., (2019). *Coastal Altimetry: A Promising Technology for the Coastal Oceanography Community*. In J. Pan, & A. Devlin (Eds.), *Estuaries and Coastal Zones - Dynamics and Response to Environmental Changes*. IntechOpen. doi:10.5772/intechopen.89373

Yıldız, H., Andersen, O.B., Simav, M., Aktuğ, B. ve 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(8), pp. 1572–1580. doi:10.1016/j.asr.2012.11.011