

Karadeniz Kıyısında TUDES Ortak Yerleşkeli GNSS İstasyonu Deniz Seviyesi Gözlemlerinden GNSS-IR Tekniği ile Gelgit Bileşenlerinin Belirlenmesi (Determination of Tidal Constituents from Sea Level Observations at the TUDES Co-Located GNSS Stations in the Black Sea Coast Using GNSS-IR Technique)

Cansu BEŞEL¹ , Emine TANIR KAYIKÇI¹ 

¹Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Trabzon

*Sorumlu yazar : cansubesel@ktu.edu.tr

Geliş Tarihi (Received): 14.02.2022

Kabul Tarihi (Accepted): 27.07.2022

ÖZ

Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri İnterferometrik Reflektometri (GNSS-IR), yansıyan sinyalleri kullanarak deniz seviyesinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Bu nedenle, geleneksel mareograf ölçümlerine alternatif bir teknik olarak düşünülmektedir. Bu çalışmada; GNSS-IR tekniğinin gelgit bileşenlerinin belirlenmesine katkısı araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi'ne (TUDES) bağlı mareograf istasyonu ile ortak yerleşkeli TRBZ sabit GNSS istasyonuna ait Sinyal Gürültü Oranı verileri kullanılmıştır. SNR verilerine dayalı olarak GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi gözlemleri hesaplanmıştır. Ardından, GNSS-IR tabanlı deniz seviyesi gözlemleri ve mareograf kayıtları için yarı-günlük (M2, S2) ve günlük (K1, O1, P1) gelgitlerin genlikleri tahmin edilmiştir. Elde edilen genlikler karşılaştırıldığında, maksimum ve minimum fark sırasıyla 4.16 cm ve 0.09 cm olarak bulunmuştur. Son olarak, mareograf kayıtlarından ve GNSS-IR tabanlı deniz seviyesi gözlemlerinden hesaplanan gelgit bileşenleri EOT20 küresel okyanus gelgit modeli ile karşılaştırılmıştır. GNSS-IR ve EOT20 küresel okyanus gelgit modeli arasındaki maksimum ve minimum genlik farkları sırasıyla 4.65 cm ve 0.35 cm olarak bulunmuştur. Çalışma sonucunda, yapılacak iyileştirmelerle beraber ülkemizde GNSS-IR tekniğinin de gelgit bileşenlerinin belirlenmesinde bir potansiyel olabileceği öngörülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deniz Seviyesi, GNSS İnterferometrik Reflektometri, Gelgit Bileşenleri, Küresel Okyanus Modelleri

ABSTRACT

Global Navigation Satellite System Interferometric Reflectometry (GNSS-IR) enables to retrieve sea surface heights using the reflected signal. Moreover, GNSS-IR is considered a promising alternative to conventional tide gauges. This study investigates the contribution of the GNSS-IR technique to the determination of tidal constituents. Within the scope of the study, we used Signal-to-Noise Ratio data from the TRBZ co-located GNSS station operated by the Turkish National Sea Level Monitoring System (TUDES). Moreover, sea level variations were calculated using GNSS-IR SNR data to examine the tidal variability and to investigate the contribution of the GNSS-IR technique to the determination of tidal constituents. Then, semi-diurnal (M2, S2) and diurnal

(K1, O1, P1) amplitudes of tidal constituents were computed from GNSS-IR-based sea level observations and tide gauge records. The comparison of amplitudes demonstrated that the maximum and minimum differences were 4.16 cm and 0.09 cm, respectively. Finally, estimated the tidal constituents from tide gauge records and GNSS-IR-based sea level observations were compared with global ocean tide models such as EOT20. The maximum and minimum differences in amplitude obtained from GNSS-IR and the EOT20 model were 4.65 cm and 0.35 cm, respectively. As a result of the study, it is considered that the improving GNSS-IR technique may also have the potential in estimating the tidal constituents.

Keywords: Sea Level, GNSS Interferometric Reflectometry, Tidal Constituents, Global Ocean Models

1. GİRİŞ

Artan deniz seviyesinin özellikle kıyı alanlarında çevresel, ekonomik ve sosyal açıdan önemli bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, deniz seviyesinde zaman içerisinde meydana gelen değişimin etkili ve doğru bir şekilde gözlemlenmesi ve değişime neden olan faktörlerin belirlenmesi özellikle kıyı alanları için önemlidir. Deniz seviyesi, iklim değişikliği çalışmalarının yanı sıra sosyal, ekonomik ve çevresel alanda birçok uygulamaya katkı sağlayan bir bilim dalı olan jeodezi için de önemlidir. Geleneksel jeodezik yaklaşımda uzun dönemli ortalama deniz seviyesinin değişmediği kabul edilmiş ve düşey kontrol ağlarının datumu olarak kullanılmıştır. Ancak zaman içerisinde global deniz ve okyanus seviyesindeki gözlenen yüksek artış hızları, deniz seviyesinin beklenildiği gibi değişmeyen bir yüzey olmadığını ortaya çıkarmıştır. Bu anlamda deniz seviyesi değişimlerinin izlenmesi ve yorumlanması jeodezik düşey datum tanımlanması ve jeoidin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (GNSS) gözlemleri konum belirleme çalışmalarının yanında jeodinamik aktiviteler, iklim değişikliği ve meteoroloji gibi çeşitli alanlarda da kullanılmaktadır. GNSS İnterferometrik Reflektometri (GNSS-IR), GNSS sinyal yansıma

etkisinden yararlanarak pek çok alanda kullanılabilen yenilikçi bir tekniktir. Sinyal yansıma etkisi, konum belirleme amaçlı kullanılan GNSS gözlemleri için istenmeyen hata kaynaklarından biridir. Ancak zaman içerisinde yapılan çeşitli çalışmalarla yansıyan sinyalin farklı çalışmalarda kullanılabilir olduğu görülmüştür. GNSS-IR tekniği; başlıca deniz seviyesi (Geremia-Nievinski ve diğerleri, 2020; Larson, Löfgren ve Haas, 2013; Larson, Ray, Nievinski ve Freymueller, 2013; Larson, Ray ve Williams, 2017; Tabibi, Sauveur, Guerrier, Metayer ve Francis, 2021; Wang, Zhang ve Zhang, 2018), kar kalınlığı (Larson ve Nievinski, 2013; Zhang ve diğerleri, 2021), toprak nemi (Larson ve diğerleri, 2008; Vey, Güntner, Wickert, Blume ve Ramatschi, 2016), buz kalınlığı (Ghiasi ve diğerleri, 2020; Selbesoğlu ve diğerleri, 2021) ve ekstrem hava olaylarının belirlenmesi (Karegar, Larson, Kusche ve Dixon, 2020; Larson ve diğerleri, 2021) gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Hassas konum belirleme için istenmeyen bu hata kaynağının deniz seviyesinin gözlemlenmesinde kullanılması, GNSS elektromanyetik dalgalarındaki doğrudan gelen ve dolaylı sinyal girişimlerinin yansıma yüzeylerinin özelliklerinin kestirilmesi ile gerçekleştirilmiştir (Martin-Neira, 1993). Daha sonra, Anderson (2000) okyanuslarda doğrudan gelen ve yansıyan sinyaller arasındaki Sinyal Gürültü Oranı (Signal to Noise Ratio, SNR) girişim desenlerini belirlemiştir. GNSS tabanlı mareograf ise ilk olarak Larson ve diğerleri (2013) tarafından SNR gözlemlerini kullanarak rölatif deniz seviyesi değişimini ölçmek için sunulmuştur. GNSS-IR tabanlı deniz seviyesinin belirlenmesine temel oluşturan bu önemli çalışmaların ardından tekniğin kullanılabilirliği ve geliştirilmesine yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Wang vd. (2018), SNR verilerine dalgacık dönüşümünden sonra Lomb-Scargle periodogram (LSP) yöntemini uygulamış ve geliştirilen yöntemin kısa dönemli SNR verileri için daha uygun olduğu görülmüştür. Geremia-Nievinski vd. (2020), Uluslararası Jeodezi Birliği (IAG) çalışma grubu 4.3.9 kapsamında gerçekleştirilen, bağımsız araştırma gruplarının yapmış olduğu SNR verilerine dayalı GNSS-IR tekniği ile hesaplanan deniz seviyesi sonuçlarını karşılaştırmıştır. Tüm gruplar GNSS-IR tabanlı deniz seviyesi ve yerinde gözlem verileri arasında yüksek oranda korelasyon elde etmiştir. Zheng vd. (2021), SNR verilerinden yararlanarak çoklu-GNSS için ters çözüm ile Doğu Afrika kıyılarında iki yıllık zaman aralığında deniz seviyesi değişimini belirleyerek tersine çözümün doğruluğunu araştırmıştır. Beşel ve Tanır Kayıkçı (2021a), Türkiye'nin Akdeniz kıyısında

bulunan MERS IGS istasyonu GPS L1 ve L5 SNR verilerini kullanarak hem LSP analizi hem de LSP ile Hareketli Ortalamalar (LSP-MA) bütünleşik bir yaklaşımla deniz seviyesi değişimini belirlemiştir. LSP-MA yöntemi sonucunda GNSS-IR tabanlı deniz seviyesi belirleme performansının arttığı görülmüştür. Beşel ve Tanır Kayıkçı (2021b), Türkiye kıyılarında bulunan denize yakın GNSS istasyonlarını kullanarak GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi belirlenebilirliğini araştırmıştır. Çalışma sonucunda, MERS ve TEKR istasyonları GNSS-IR ile deniz seviyesi belirlenmesine elverişli istasyonlar olarak bulunmuştur. GNSS-IR tekniği halen devam etmekte olan iyileştirme çalışmaları ile birlikte deniz seviyesinin belirlenmesine alternatif bir teknik olarak gösterilmektedir. Dolayısıyla bilim dünyasında oldukça ilgi görmektedir.

Deniz seviyesi gözlemlerini etkileyen çeşitli faktörler bulunmaktadır. Sıcaklık, rüzgar hızı, atmosferik basınç gibi meteorolojik parametreler ve gelgit etkisi başlıca faktörlerdir. Deniz seviyesinde gelgit değişimine bağlı olarak zaman içerisinde artma veya azalma meydana gelmektedir. Bunun sonucunda deniz seviyesi sabit kalmamaktadır. Artma veya azalma eğilimleri konuma göre değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, deniz seviyesindeki değişime etki eden faktörlerin belirlenmesi ve doğru olarak tahmin edilmesi için gelgit etkisinin belirlenmesi önemlidir. Gelgit etkisi temelde çeşitli harmonik analizler veya küresel okyanus modelleri ile belirlenmektedir. Kıyı alanlarındaki gelgit etkisini belirlemek için çoğunlukla mareograf deniz seviyesi kayıtlarından gelgit analizi yapılmaktadır. Son zamanlarda GNSS-IR tekniğinin çeşitli alanlardaki uygulamalarının yanında gelgit bileşenlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalarda da kullanıldığı görülmektedir. Bu açıdan, mareograf istasyonları ile deniz seviyesi belirlenmesine alternatif olarak gösterilen GNSS-IR tekniğinin gelgit etkisi belirlenmeye katkısının araştırılması önemlidir. Löfgren vd. (2014), beş farklı GPS istasyonundan hesaplamış olduğu GNSS-IR tabanlı deniz seviyesi ve mareograf kayıtları için gelgit harmonik analizi yaparak karşılaştırmış olup uzun periyotlu gelgitlerin daha büyük farklara sahip olduğunu görmüştür. Williams & Nievinski (2017), GNSS-IR ile tahmin edilen tüm büyük gelgit harmoniklerini yakında bulunan mareograf istasyonu ile tahmin edilen harmoniklerden küçük olarak bulmuştur. Larson vd. (2017), L1 SNR verilerinden GNSS-IR tekniği ile tahmin etmiş olduğu deniz seviyesi ve mareograf kayıtlarından hesapladığı gelgit bileşenlerini karşılaştırmıştır. Sonuç olarak

maksimum farkı K1 bileşeninde bulmuştur. Tabibi vd. (2020), L1 SNR ve L2 SNR verilerinden yararlanarak Antarktika ve Grönland bölgesinde GNSS-IR tekniği ile günlük ve yarı-günlük gelgit bileşenlerini hesaplamıştır. Ardından, gelgit bileşenlerini mareograf, küresel ve bölgesel okyanus modelleri ile karşılaştırarak bir saatin altındaki GNSS-IR tabanlı deniz seviyesi gözlemlerinin gelgit bileşenlerinin hesaplanmasında kullanılabilir olduğunu görmüştür. Ülkemizde ise kıyıya yakın GNSS istasyonları kullanarak GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi çeşitli çalışmalar ile belirlenmiştir (Altuntaş ve Tunalıoğlu, 2022; Beşel ve Tanır Kayıkçı, 2021b, 2021a). Ancak GNSS-IR tekniği ile belirlenen deniz seviyesinden gelgit analizi çalışmasına ise henüz rastlanmamıştır.

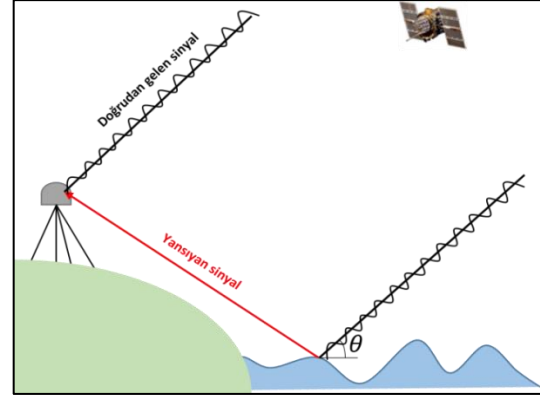
Bu çalışmada, ülkemizde denize yakın GNSS istasyonu kullanarak GNSS-IR tekniği ile elde edilen deniz seviyesi gözlemlerinin gelgit bileşenlerinin belirlenmesine katkısının araştırılması amaçlanmaktadır. Bunun için, Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES) ortak yerleşkeli TRBZ GNSS istasyonu kullanarak GNSS-IR tabanlı deniz seviyesi değişimi belirlenmiştir. Elde edilen deniz seviyesi değişimlerinden harmonik analiz ile gelgit bileşenleri hesaplanmıştır. Ardından GNSS-IR, mareograf ve EOT20 küresel okyanus gelgit modelinden hesaplanan her bir gelgit bileşeni karşılaştırılmıştır.

2. YÖNTEM

a. GNSS İnterferometrik Reflektometri

Kıyı alanlarında bulunan GNSS istasyonlarından yararlanan GNSS-IR tekniği sağladığı önemli avantajlarla birlikte kıyısız deniz seviyesinin izlenmesine olanak sağlamaktadır. Başlıca avantajları şu şekilde sıralanabilir: (1) mareografin aksine düşey yer hareketinden etkilenmez; (2) geleneksel mareograf istasyonuna nazaran kıyıdan daha geniş alandaki deniz seviyesi değişikliklerini algılar; (3) kurulum ve bakım maliyeti daha düşüktür; (4) sensörü kalibre etme ihtiyacı yoktur; (5) Uluslararası Yersel Referans Ağı'na (ITRF) göre deniz seviyesinin ölçülmesine olanak sağlar.

GNSS-IR tekniği, anten faz merkezi ve deniz seviyesi arasındaki düşey mesafenin ölçülmesi ile deniz seviyesinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. GNSS antenine gelen doğrudan sinyal ile yansıyan sinyal anten faz merkezinde birleşmekte olup burada bir girişim deseni oluşturmaktadır (Şekil 1). Bu girişim deseni en fazla SNR verilerinde gözlemlenmektedir.



Şekil 1. Deniz seviyesinin izlenmesinde GNSS-IR (θ; uydu yükseklik açısı)

Alıcıya gelen sinyalin SNR ile olan matematiksel ilişkisi,

$$SNR^2 \approx A_c^2 = A_d^2 + A_r^2 + 2A_dA_r\cos\psi \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, A_c ; girişim yapan sinyalin genliği, A_d ; doğrudan gelen sinyalin genliği, A_r ; yansıyan sinyalin genliği, ψ ise iki sinyal arasındaki faz farkını ifade etmektedir. Doğrudan gelen sinyalin etkisini kaldırarak sadece yansıyan sinyali kullanmak için tüm veriye düşük dereceli polinom uygulanarak trend veri setinden çıkarılmaktadır. Böylece, doğrudan gelen sinyalin etkisinin kaldırıldığı trendden arındırılmış SNR verileri (δSNR) elde edilmektedir. Trendden arındırılmış SNR verisi için sinyal yansıma etkisi salınımları,

$$\delta SNR = A\cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\sin(\theta) + \varphi\right) \quad (2)$$

olarak ifade edilir. Burada, A ; genlik, h ; anten faz merkezi ile yansıma yüzeyi arasındaki düşey mesafe (reflektör yüksekliği), λ ; GNSS taşıyıcı dalga boyu, θ ; uydu yükseklik açısını, φ ; faz ofsetini ifade etmektedir. δSNR salınımlarındaki baskın frekans LSP yöntemi ile belirlenebilmektedir. Baskın frekans en yüksek spektral güce karşılık gelmekte olup $H = \frac{\lambda f}{2}$ kullanılarak reflektör yüksekliğine dönüştürülmektedir (Larson, Ray, ve diğerleri, 2013).

b. Gelgit Bileşenlerinin Belirlenmesi

Ay ve Güneş'in çekim kuvvetiyle meydana gelen gelgitler, deniz seviyesi değişimine etki eden en önemli faktörlerden biridir. Deniz seviyesi üzerinde harmonik ve düzenli etkiye sahiptir. Gelgit sinyalleri çok sayıda farklı genlik ve frekansa sahip harmonik bileşenler tarafından

ifade edilebilmektedir. Bir harmonik model,

$$h(t_j) = H_0 + A \cos(w_a t_j + \alpha) + B \cos(w_b t_j + \beta) + \dots \quad (3)$$

şeklinde. Burada; t_j zaman, H_0 ; ortalama deniz seviyesi, A ve B ; gelgit bileşenleri genlikleri, α ve β ; başlangıç faz açıları, w_a ve w_b gelgit bileşenlerinin açısal hızlarını ifade etmektedir (Schureman, 2001). Bu çalışmada, gelgit bileşenlerinin genliklerini belirlemek için Pawlowicz vd. (2002) tarafından geliştirilen MATLAB programlama dilinde yazılan **T_Tide** klasik gelgit harmonik analiz yazılımı kullanılmıştır. Gelgit türleri yarı-günlük, günlük ve karışık olmak üzere üç temel türe ayrılmaktadır. Tablo 1'de günlük ve yarı-günlük olmak üzere beş temel gelgit bileşenine ait bilgiler verilmektedir.

Tablo 1. Temel gelgit bileşenleri

Bileşen	Açıklama	Periyot (Saat)
K1	Lunar Solar, Günlük	23.93
P1	Main Solar, Günlük	24.06
O1	Main Lunar, Günlük	25.81
M2	Main Lunar, Yarı-günlük	12.42
S2	Main Solar, Yarı-günlük	12.00

c. Performans Değerlendirmesi

GNSS-IR tabanlı deniz seviyesi ile mareograf kayıtları karşılaştırılarak tekniğin performansı değerlendirilmiştir. Bunun için, Pearson korelasyon katsayısı ve Karesel Ortalama Hata (KOH) metrikleri kullanılmıştır. Pearson korelasyonu ($r_{\text{GNSSIRMAR}}$) ve KOH,

$$r_{\text{GNSSIRMAR}} = \frac{m_{\text{GNSSIRMAR}}}{m_{\text{GNSSIR}} m_{\text{MAR}}} \quad (4)$$

$$\text{KOH} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(S_{\text{GNSSIR},i} - S_{\text{MAR},i})^2}{n}} \quad (5)$$

şeklinde. Burada; m_{GNSSIR} ve m_{MAR} değişkenlerin ortalama hatalarını, $m_{\text{GNSSIRMAR}}$ ($\text{GNSSIR}_i, \text{MAR}_i$) değişken çiftinin kovaryansını, n ; veri sayısını, S_{GNSSIR} ; GNSS-IR tekniği ile hesaplanan deniz seviyesi gözlemlerini, S_{MAR} ; mareograf istasyonu deniz seviyesi kayıtlarını ifade etmektedir.

3. UYGULAMA

a. Çalışma Alanı ve Veri

Çalışma kapsamında, TUDES bünyesinde bulunan mareograf ortak yerleşkeli TRBZ GNSS istasyonu kullanılmıştır. TRBZ istasyonu Doğu Karadeniz kıyısında, Trabzon ilinde bulunmaktadır. İstasyon Trimble alıcı ve TRM39105.00 anten donanımına sahiptir. Çalışmada GPS L1 frekansı SNR verileri kullanılmıştır. Veri zaman aralığı yaklaşık iki yıl (Temmuz 2019-Ağustos 2020) olup veri kayıt aralığı ise 30 saniyedir. GNSS tabanlı deniz seviyesi değişimlerini karşılaştırarak doğrulama yapmak için istasyona ortak yerleşkeli Trabzon mareograf istasyonu kayıtlarından yararlanılmıştır. Trabzon mareograf istasyonu radar sensörlü sisteme sahip ve veri kayıt aralığı 15 dakikadır (Şekil 2). Tablo 2'de TRBZ GNSS istasyonu ve Trabzon mareograf istasyonuna ait bilgiler verilmiştir.



(a)



(b)

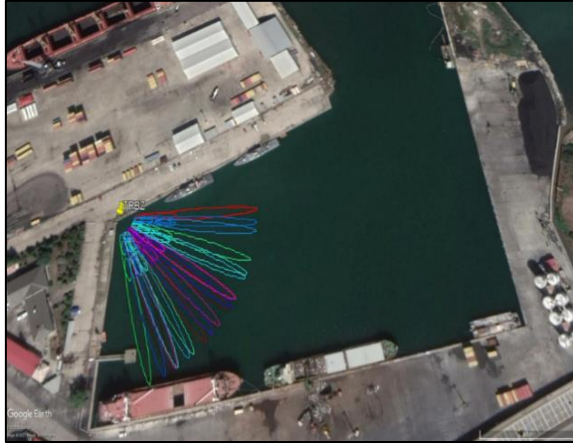
Şekil 2. (a) GNSS istasyonu konumu; (b) TRBZ mareograf ortak yerleşkeli GNSS istasyonu

Tablo 2. Çalışmada kullanılan istasyon bilgileri

İstasyon	Enlem (derece)	Boylam (derece)	Boşluk Oranı (%)	Veri Kayıt Aralığı
TRBZ	41.0019	39.7445	0.22	30 sn
Trabzon	41.0019	39.7445	2.5	15 dk

b. Veri Analizi

Jeodezik GNSS-IR; GNSS alıcısı ve yansıtıcı yüzey arasındaki mesafe ve GNSS uydu pozisyonlarına bağlıdır. Bu nedenle, öncelikle istasyonun bulunduğu bölgede deniz alanlarını kapsayacak şekilde uydu yükseklik açısı ve azimut aralıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 3'te 5°, 10° ve 15° uydu yükseklik açısına sahip uydu izleri için hesaplanan Fresnel bölgeleri Google Earth görüntüsü üzerinde gösterilmiştir.



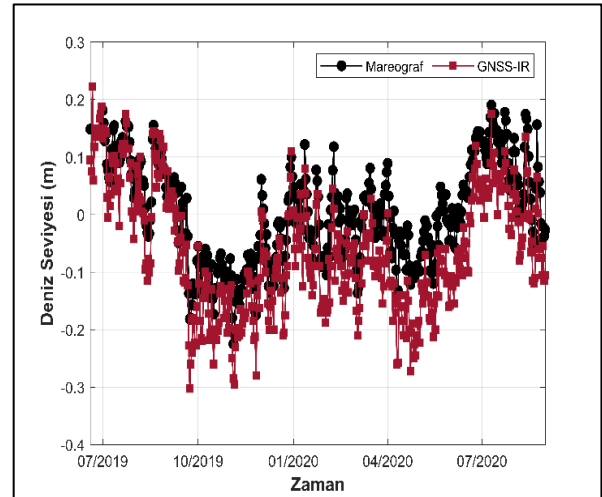
Şekil 3. TRBZ istasyonu Fresnel bölgesi

Uydu yükseklik açısı arttıkça yansıma bölgeleri antene yaklaşmaktadır. Bu nedenle, TRBZ istasyonunun bulunduğu bölgede 15° üzerindeki uydu yükseklik açılarında Fresnel bölgelerinin karasal alanları içerebileceği ve aynı zamanda istasyonun liman içerisinde bulunması sebebiyle gemilerin istasyon yakınında olabileceği de göz önünde bulundurularak uydu yükseklik açısı aralığı 5°-15°, azimut aralığı ise 85°-160° olarak seçilmiştir. Çalışmada kullanılan azimut ve yükseklik açısı aralıkları Tablo 3'te gösterilmiştir.

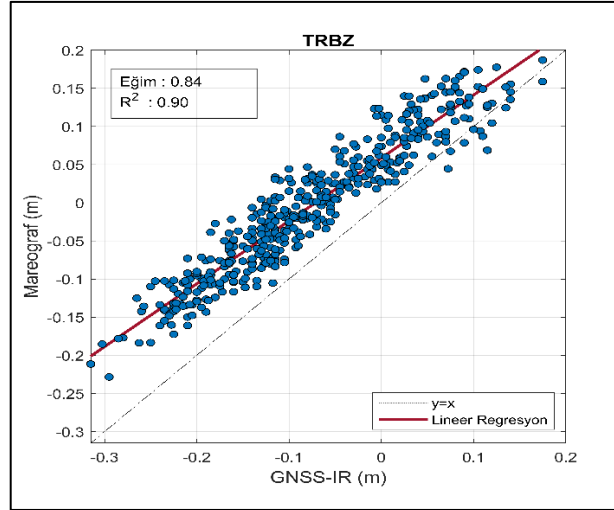
Tablo 3. Azimut ve uydu yükseklik açısı aralıkları

	TRBZ
Azimut (derece)	85-160
Yükseklik açısı (derece)	5-15

İlgili koşulları sağlayan tüm uydular yükselen ve alçalan uydu geçişleri olarak iki gruba ayrılmıştır. Gruplarda bulunan tüm uydulara ait SNR verilerine 2. dereceden polinom uygulanarak doğrudan gelen sinyalin etkisinden arındırılmış δ SNR verileri elde edilmiştir. Ardından, δ SNR salınımlarına uygulanan LSP sonucunda en yüksek spektral güce karşılık gelen baskın yansıma etkisi frekansı reflektör yüksekliğine dönüştürülmüştür. Bu aşamada, LSP sonucu hesaplanan pik değerlerinin anlamlı olup olmadığına karar vermek için pik-gürültü oranı testi uygulanmıştır (Larson, Löfgren, ve diğerleri, 2013). Buna göre en yüksek reflektör yüksekliği genliğinin gürültüye oranı 2.7 eşik değerinden küçük olan yansımalar anlamsız kabul edilip analizde kullanılmamıştır. Daha sonra, belirlenen reflektör yüksekliklerinin GNSS anteninin ortometrik yüksekliğinden farkı alınarak deniz seviyesi belirlenmiştir. TRBZ istasyonunda belirlenen deniz seviyesi aynı istasyonla ortak yerleşkeli Trabzon mareograf kayıtları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4, Şekil 5).



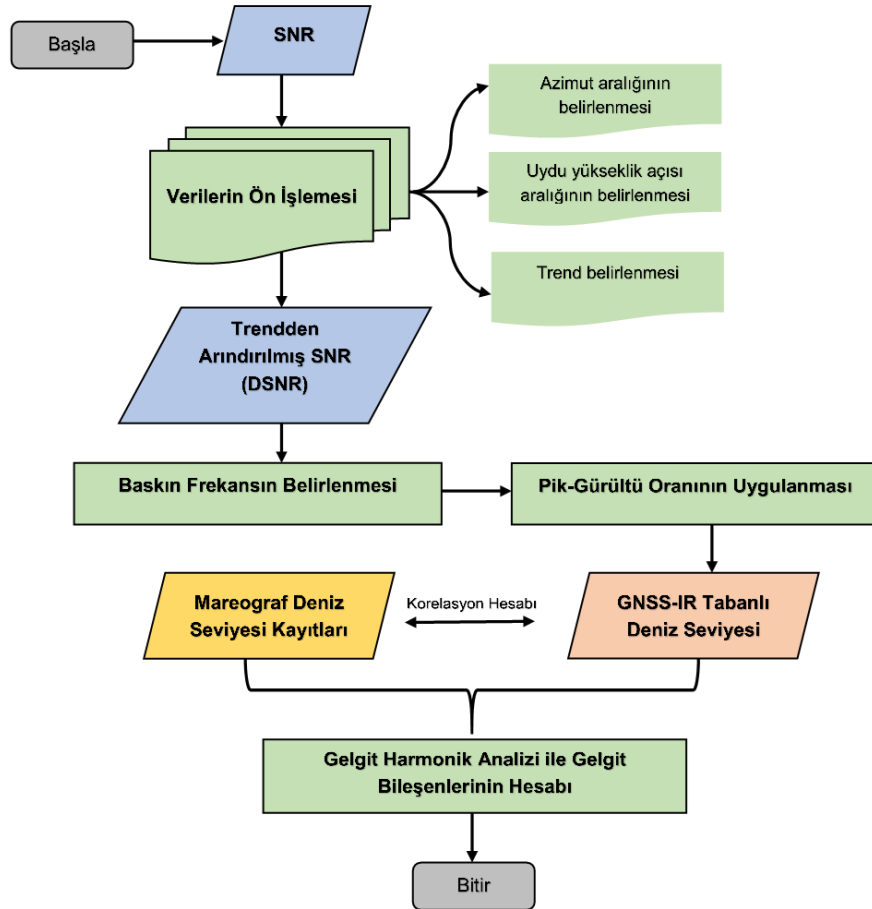
Şekil 4. GNSS-IR ile tahmin edilen ve Trabzon mareograf kayıtlarından elde edilen deniz seviyesi değişim grafiği



Şekil 5. GNSS-IR ve mareograf ile elde edilen deniz seviyesi değişimi saçılım grafiği

Her iki deniz seviyesi değişimi zaman serisi arasındaki Pearson korelasyonu 0.95, KOH değeri ise 2.83 cm olarak bulunmuştur. GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi gözlem değerleri arasındaki eğim 0.84 m/m ve R^2 katsayısı ise

0.90 olarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan GNSS-IR tabanlı deniz seviyesi belirlenmesine yönelik detaylı bilgiler (Beşel ve Tanır Kayıkçı, 2021b) çalışmasında bulunabilir. Şekil 6'da çalışmaya ait iş akış şeması verilmiştir.



Şekil 6. GNSS-IR ile deniz seviyesi tahmini ve gelgit bileşenlerinin hesabı iş akış şeması

Tablo 4. Mareograf kayıtları ve GNSS-IR tekniği ile elde edilen deniz seviyesi değişimlerinden hesaplanan gelgit genlikleri, faz ve duyarlılıkları

Bileşen	Mareograf				GNSS-IR				Farklar	
	Gen. (cm)	Gen. Duy. (cm)	Faz (°)	Faz Duy. (°)	Gen. (cm)	Gen. Duy. (cm)	Faz (°)	Faz Duy. (°)	Gen. (cm)	Faz (°)
P1	0.45	0.1	221.08	12.7	1.05	0.7	62.73	43.1	0.6	158.35
K1	0.83	0.1	256.3	5.72	4.99	0.6	231.7	7.49	4.16	24.6
O1	0.66	0.1	245.05	6.61	0.57	0.5	239.23	62.98	-0.09	5.82
M2	2.53	0.1	260.42	1.5	1.73	0.6	213.43	18.3	-0.8	46.99
S2	1.16	0.1	203.9	3	0.91	0.5	342.09	36.22	-0.25	-138.19

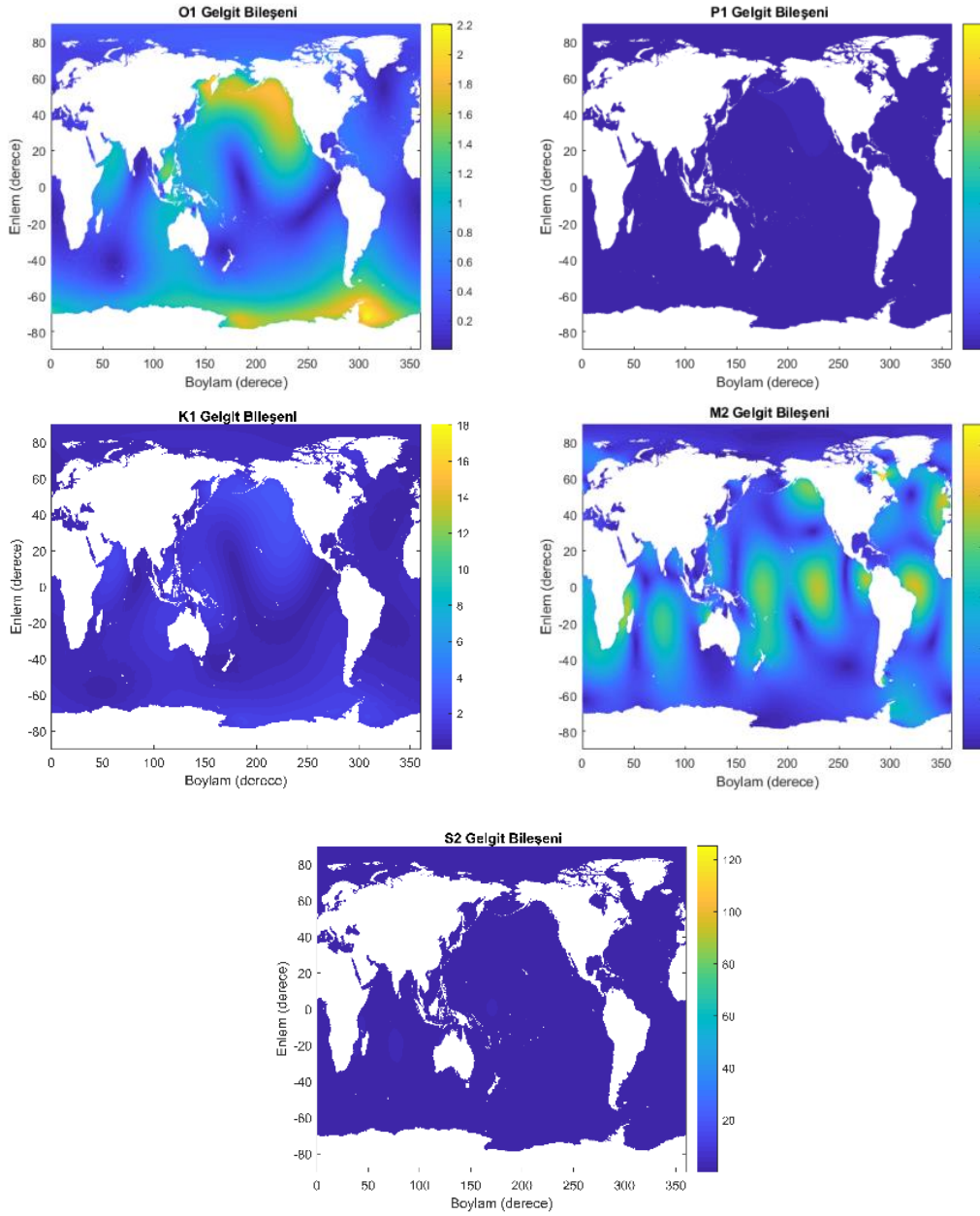
GNSS-IR tabanlı deniz seviyesi ve mareograf kayıtları için harmonik analiz yöntemi ile günlük (P1,K1,O1) ve yarı-günlük (M2,S2) temel gelgit bileşenleri genlikleri ve fazları hesaplanmıştır. Tablo 4'te yaklaşık 2 yıllık zaman aralığına sahip GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi değişimlerinden hesaplanan gelgit genlikleri, fazları ve %95 istatistik güven ile duyarlılıkları verilmiştir. GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi değişimlerinden hesaplanan gelgit bileşenleri genlikleri karşılaştırıldığında; maksimum farkın 4.16 ± 0.5 cm ile K1 bileşeninde, minimum farkın ise -0.09 ± 0.4 cm ile O1 bileşeninde olduğu görülmüştür. Yarı-günlük (M2,S2) bileşenler mareograf ile kıyasladığında GNSS-IR ile daha küçük sonuçlar elde edilmiştir. GNSS-IR tekniği ve mareograf kayıtları ile elde edilen deniz seviyesi değişimlerinden hesaplanan gelgit genliklerinin farklarının ortalaması ve standart sapması sırasıyla 0.72 cm ve 1.98 cm olarak hesaplanmıştır. Burada, GNSS-IR genlik bileşenleri mareograf genlik bileşenlerine göre daha düşük hassasiyete sahip olarak bulunmuştur. Mareograf ile hesaplanan gelgit genliklerinin tamamı istatistiksel olarak anlamlıdır. GNSS-IR ve mareograf ile elde edilen gelgit genlikleri farklarının büyük çoğunluğu ise istatistiksel olarak anlamsızdır. Tabibi vd. (2020) çalışmasında mareograf ile hesaplanan gelgit bileşenlerini GNSS-IR tekniğine göre daha hassas bulmuştur. Aynı çalışmada mareograf ve

GNSS-IR gelgit bileşenleri farklarının çoğunluğunun istatistiksel anlamsız olduğu görülmüştür. GNSS-IR tekniği ile elde edilen gelgit genlikleri, tekniğin deniz seviyesi kestirim doğruluğuna bağlı olarak değişecektir. Bu aşamada GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi belirlemeye ilişkin geliştirme ve iyileştirme çalışmaları ile gelgit belirleme duyarlılığının da artırılması mümkündür.

Çalışmada aynı zamanda GNSS-IR ve mareograf ile hesaplanan gelgit bileşenleri EOT20 küresel okyanus gelgit modelinden hesaplanan günlük ve yarı-günlük gelgit bileşenleri ile karşılaştırılmıştır. EOT20, Münih Teknik Üniversitesi, Alman Jeodezik Araştırma Enstitüsünde (DGFI-TUM) geliştirilen küresel okyanus gelgit modelidir. Okyanus gelgitlerinin artık sinyallerini tahmin etmek için FES2014 referans gelgit modeline göre gelgit analizi yapmaktadır. Çeşitli uydu altimetre misyonlarını kullanarak 17 gelgit bileşenine ait genlik ve faz değerlerini hesaplamaktadır. EOT 20 modelinin özellikle kıyı alanlarında iyi sonuçlar verdiği belirtilmektedir (Hart-Davis ve diğerleri, 2021). Tablo 5'te modele ilişkin bilgiler sunulmuştur. Şekil 7'de EOT20 küresel okyanus gelgit modeline göre hesaplanan O1, P1,K1,M2 ve S2 gelgit bileşenleri genlikleri gösterilmiştir. Bu model üzerinden de ülkemiz Karadeniz kıyılarının düşük gelgit genliklerine sahip olduğu görülmüştür.

Tablo 5. EOT20 küresel okyanus gelgit modeline ilişkin bilgiler

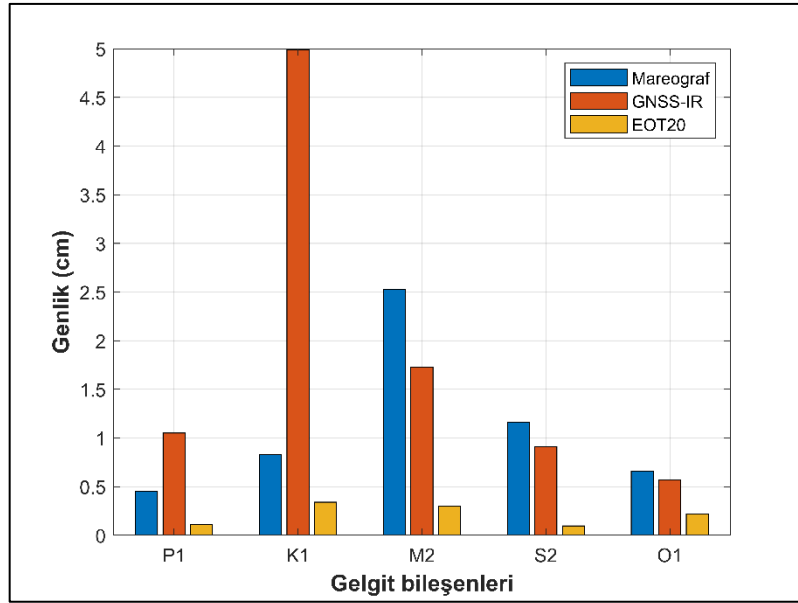
Model	Girdi	Çözünürlük	Gelgit Bileşenleri
EOT20	Topex/Poseidon, Jason-1/2/3, ERS-1/2, Envisat, ALES retracker	$0.125^\circ \times 0.125^\circ$	17 bileşen (2N2, J1, K1, K2, M2, M4, MF, MM, N2, O1, P1, Q1, S1, S2, SA, SSA ve T2)



Şekil 7. EOT20 küresel okyanus gelgit modeli ile tahmin edilen günlük ve yarı-günlük gelgit bileşenleri genlikleri (cm)

Tablo 6. Mareograf, GNSS-IR ve EOT20 küresel okyanus gelgit modeli gelgit genlikleri karşılaştırması

BİLEŞEN	MAREOGRAF	GNSS-IR	EOT20
	Genlik (cm)	Genlik (cm)	Genlik (cm)
P1	0.45	1.05	0.11
K1	0.83	4.99	0.34
O1	0.66	0.57	0.22
M2	2.53	1.73	0.3
S2	1.16	0.91	0.097



Şekil 8. Gelgit bileşenleri genlikleri

Tablo 7. GNSS-IR ve mareograf gelgit genlikleri ile EOT20 küresel okyanus gelgit modeli gelgit genlikleri arası farklar

İstasyon	Model	P1	K1	O1	M2	S2
TRBZ	EOT20	0.94	4.65	0.35	1.43	0.813
Trabzon		0.34	0.49	0.44	2.23	1.063

Tablo 6'da ve Şekil 8'de mareograf, GNSS-IR ve EOT20 ile hesaplanan gelgit bileşenleri genlikleri verilmiştir. Tüm gelgitlerde, GNSS-IR ile mareograf arasındaki uyumun GNSS-IR ile EOT20 modeli arasındaki uyumdan daha iyi olduğu görülmüştür. GNSS-IR tekniği hem mareograf hem de EOT20 küresel okyanus gelgit modeli ile en iyi uyumu O1 bileşeninde sağlamıştır. En kötü uyum ise K1 bileşenindedir. EOT20 modelinin hem mareograf hem de GNSS-IR ile az uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durumun EOT20 model hataları kaynaklı olabileceği düşünülebilir (Özel, 2020). Tablo 7'de TRBZ GNSS istasyonu SNR verilerinden hesaplanan deniz seviyesi gözlemlerine ait gelgit genlikleri ve mareograf kayıtları gelgit genliklerinin EOT20 küresel okyanus gelgit modeline göre farkları sunulmuştur. Buna göre, GNSS-IR ve mareograf ile hesaplanan gelgit bileşenlerinin EOT20 küresel okyanus gelgit modeli ile karşılaştırılması sonucunda maksimum farkın 4.65 cm değeriyle GNSS-IR ve EOT20 küresel okyanus gelgit modeli arasında K1 bileşeninde, minimum farkın ise 0.34 cm değeriyle mareograf ve EOT20 küresel okyanus gelgit modeli arasında P1

bileşeninde olduğu görülmüştür. Çalışmada GNSS-IR, mareograf ve EOT20 küresel okyanus gelgit modelinden tahmin edilen gelgit genlikleri arasındaki maksimum fark K1 bileşeninde bulunmuştur. Larson vd. (2017)'e göre, en büyük gelgit genliği farkının K1 bileşeninde olması GPS uydu geometrisinden kaynaklı olabilmektedir. Burada, uydu geometrisi sinyal yansıma etkisi ile ilişkili olduğundan benzer şekilde GNSS yansıma verileri de geometrik hatalarla ilişkilendirilebilmektedir. Aynı zamanda troposferik gecikme etkisinin de göz önünde bulundurulması gerektiği belirtilmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ülkemizde GNSS-IR tekniğinin gelgit bileşenlerinin belirlenmesine katkısı araştırılmıştır. Bunun için, Karadeniz kıyısında bulunan TRBZ GNSS istasyonu SNR verilerinden GNSS-IR tabanlı elde edilen deniz seviyesi değişimleri ile gelgit harmonik analizi yapılarak gelgit bileşenleri hesaplanmıştır. Elde edilen gelgit bileşenleri mareograf kayıtlarından ve EOT20 küresel okyanus gelgit modelinden hesaplanan gelgit bileşenleri ile karşılaştırılmıştır.

Çalışma sonucunda tüm gelgit bileşenleri cm mertebesinde hesaplanmış olup en tutarsız sonuç K1 günlük bileşeninde bulunmuştur. GNSS-IR tekniğinin mareograf ve EOT20 küresel okyanus gelgit modeli ile en iyi uyumun O1 bileşeninde olduğu görülmüştür. GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi değişimlerinden hesaplanan gelgit bileşenleri karşılaştırıldığında, maksimum fark 4.16 cm ve minimum fark ise -0.09 cm olarak bulunmuştur.

GNSS istasyonunun bulunduğu bölgedeki gelgit olaylarının, hesaplanan reflektör yüksekliğine etki ettiği bilinmektedir. Bu anlamda, GNSS-IR tekniği ile hesaplanan deniz seviyesi değişimlerinde gelgit genliklerinin belirlenmesi önemli olmaktadır. Bununla birlikte, Türkiye'nin Karadeniz kıyılarının düşük gelgit genliklerine sahip olması sebebiyle gerçekleşen gelgitlerin reflektör yükseklikleri üzerinde bir etkiye sahip olmayacağı değerlendirilmektedir. Diğer yandan, akustik sensöre sahip mareograf istasyonlarındaki termal duyarlılık genlik bileşenlerini etkilemektedir. Bu açıdan GNSS istasyonlarının kullanılması termal duyarlılığa karşı üstünlük sağlayabilir. Yine ülkemizdeki mareograf istasyonlarında radar sensör bulunması bir avantaj olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak; GNSS-IR tekniğinin ülkemizde deniz seviyesinin izlenmesi açısından önemli bir potansiyel olabileceği gerçektir. Bu çalışma ile ülkemiz Karadeniz kıyılarında GNSS-IR tekniğinin de gelgit bileşenlerinin belirlenmesinde uygulanabilirliği araştırılmış ve ilk analiz sonuçları sunulmuştur. Elde edilen sonuçların, GNSS-IR tekniğinin deniz seviyesi belirleme performansı üzerine yapılan iyileştirme çalışmaları ile birlikte geliştirilmesi mümkündür. Ayrıca daha uzun zaman aralığına sahip GNSS-IR deniz seviyesi değişimi zaman serilerinden hesaplanan gelgit bileşenleri, bu tekniğin gelgit çalışmalarında kullanılabilirliğinin değerlendirilmesinde alternatif bir çözüm sunacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan veriler Karadeniz Teknik Üniversitesi ve Harita Genel Müdürlüğü arasında yürütülen "Karadeniz Kıyılarındaki Deniz Seviyesi Değişiminin GNSS-IR Tekniği İle Araştırılması" başlıklı ortak araştırma projesi kapsamında temin edilmiştir. Harita Genel Müdürlüğü, Jeodezi Dairesine ve Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi'ne teşekkür ederiz.

Şekil 2(b), TUDES tarafından (<https://tudes.harita.gov.tr/Portal/>) sağlanmıştır.

ORCID

Cansu BEŞEL  <https://orcid.org/0000-0003-3434-6483>

Emine TANIR KAYIKÇI  <https://orcid.org/0000-0001-8259-5543>

KAYNAKLAR

- Altuntaş, C. ve Tunalıoğlu, N. (2022). Deniz seviyesi değişimlerinin belirlenmesinde GNSS-IR yönteminin kullanımı ve doğruluk analizi üzerine bir araştırma. *Geomatik*, 7(3). doi:10.29128/geomatik.946594
- Anderson, K. D. (2000). Determination of water level and tides using interferometric observations of GPS signals. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 17(8), 1118–1127. doi:10.1175/1520-0426(2000)017<1118:DOWLAT>2.0.CO;2
- Beşel, C. ve Tanır Kayıkçı, E. (2021a). Determination of Sea Level Variations in Turkish Mediterranean Coast Using GNSS Reflectometry. *Survey Review*. doi:10.1080/00396265.2021.1939589
- Beşel, C. ve Tanır Kayıkçı, E. (2021b). Türkiye denizlerinde GNSS reflektometre tekniği ile deniz seviyesi değişiminin araştırılması. *Journal of Geodesy and Geoinformation*, 8(1), 1–17. doi:10.9733/jgg.2021r0001.t
- Geremia-Nievinski, F., Hobiger, T., Haas, R., Liu, W., Strandberg, J., Tabibi, S., ... Williams, S. (2020). SNR-based GNSS reflectometry for coastal sea-level altimetry: results from the first IAG inter-comparison campaign. *Journal of Geodesy*, 94(8), 1–15. doi:10.1007/s00190-020-01387-3
- Ghiasi, Y., Duguay, C. R., Murfitt, J., van der Sanden, J. J., Thompson, A., Drouin, H. ve Prévost, C. (2020). Application of GNSS interferometric reflectometry for the estimation of lake ice thickness. *Remote Sensing*, 12(17), 1–9. doi:10.3390/RS12172721
- Hart-Davis, M. G., Piccioni, G., Dettmering, D., Schwatke, C., Passaro, M. ve Seitz, F. (2021). EOT20: A global ocean tide model from multi-mission satellite altimetry. *Earth System Science Data*, 13(8), 3869–3884. doi:10.5194/essd-13-3869-2021

- Karegar, M. A., Larson, K. M., Kusche, J. ve Dixon, T. H. (2020). Novel Quantification of Shallow Sediment Compaction by GPS Interferometric Reflectometry and Implications for Flood Susceptibility. *Geophysical Research Letters*, 47(14), 0–3. doi:10.1029/2020GL087807
- Larson, K. M., Lay, T., Yamazaki, Y., Cheung, K. F., Ye, L., Williams, S. D. P. ve Davis, J. L. (2021). Dynamic Sea Level Variation From GNSS: 2020 Shumagin Earthquake Tsunami Resonance and Hurricane Laura. *Geophysical Research Letters*, 48(4). doi:10.1029/2020GL091378
- Larson, K. M., Löfgren, J. S. ve Haas, R. (2013). Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. *Advances in Space Research*, 51(8), 1301–1310. doi:10.1016/j.asr.2012.04.017
- Larson, K. M. ve Nievinski, F. G. (2013). GPS snow sensing: Results from the EarthScope Plate Boundary Observatory. *GPS Solutions*, 17(1), 41–52. doi:10.1007/s10291-012-0259-7
- Larson, K. M., Ray, R. D., Nievinski, F. G. ve Freymueller, J. T. (2013). The accidental tide gauge: A GPS reflection case study from kachemak bay, Alaska. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(5), 1200–1204. doi:10.1109/LGRS.2012.2236075
- Larson, K. M., Ray, R. D. ve Williams, S. D. P. (2017). A 10-year comparison of water levels measured with a geodetic GPS receiver versus a conventional tide gauge. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(2), 295–307. doi:10.1175/JTECH-D-16-0101.1
- Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E. D., Bilich, A. L., Braun, J. J. ve Zavorotny, V. U. (2008). Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. *Geophysical Research Letters*, 35(24), 1–5. doi:10.1029/2008GL036013
- Löfgren, J. S., Haas, R. ve Scherneck, H. G. (2014). Sea level time series and ocean tide analysis from multipath signals at five GPS sites in different parts of the world. *Journal of Geodynamics*, 80, 66–80. doi:10.1016/j.jog.2014.02.012
- Martin-Neira, M. (1993). A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry. *ESA Journal*, 17(4), 331–355.
- Özel Ö.(2020). Okyanus Gelgit Yükleme Konum Değişimlerinin VLBI Ölçülerinden Kestirimi ve Global Okyanus Gelgit Modelleri İle Doğrulanması (Yüksek Lisans Tezi), Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Pawlowicz, R., Pawlowicz, R., Beardsley, R. C., Beardsley, R., Lentz, S. ve Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates. in *MATLAB using T TIDE. Computers & Geosciences*, 28(8), 929–937. <http://www.ocgy.ubc.ca/~rich>. adresinden erişildi.
- Schureman, P. (2001). Manual of Harmonic Analysis and Prediction of Tides. Washington: U.S. Department of Commerce Coastal and Geodetic Survey.
- Selbesoğlu, M. O., Yavaşoğlu, H. H., Karabulut, M. F., Yavaşoğlu, H. A., Özcan, H. G., Oktar, Ö., ... Güllal, V. E. (2021). Antarktika'da Küresel İklim Değişikliği İzleme için GNSS İstasyon Tasarımı: TUR1 ve TUR2 GNSS İstasyonlarının 4. Ulusal Antarktika Bilim Seferi'nde Antarktika Horseshoe Adası'na Kurulumu. *Afyon Kocatepe University Journal of Sciences and Engineering*, 21(6), 1353–1365. doi:10.35414/akufemubid.946282
- Tabibi, S., Geremia-Nievinski, F., Francis, O. ve van Dam, T. (2020). Tidal analysis of GNSS reflectometry applied for coastal sea level sensing in Antarctica and Greenland. *Remote Sensing of Environment*, 248. doi:10.1016/j.rse.2020.111959
- Tabibi, S., Sauveur, R., Guerrier, K., Metayer, G. ve Francis, O. (2021). SNR-Based GNSS-R for Coastal Sea-Level Altimetry.
- Vey, S., Güntner, A., Wickert, J., Blume, T. ve Ramatschi, M. (2016). Long-term soil moisture dynamics derived from GNSS interferometric reflectometry: a case study for Sutherland, South Africa. *GPS Solutions*, 20(4), 641–654. doi:10.1007/s10291-015-0474-0
- Wang, X., Zhang, Q. ve Zhang, S. (2018). Water levels measured with SNR using wavelet decomposition and Lomb–Scargle periodogram. *GPS Solutions*, 22(1). doi:10.1007/s10291-017-0684-8

- Williams, S. D. P. ve Nievinski, F. G. (2017). Tropospheric delays in ground-based GNSS multipath reflectometry—Experimental evidence from coastal sites. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(3), 2310–2327. doi:10.1002/2016JB013612
- Zhang, S., Peng, J., Zhang, C., Zhang, J., Wang, L., Wang, T. ve Liu, Q. (2021). GiRsnow: an open-source software for snow depth retrievals using GNSS interferometric reflectometry. *GPS Solutions*, 25(2), 1–8. doi:10.1007/s10291-021-01096-0
- Zheng, N., Chen, P. ve Li, Z. (2021). Accuracy analysis of ground-based GNSS-R sea level monitoring based on multi GNSS and multi SNR. *Advances in Space Research*, 68(4), 1789–1801. doi:10.1016/j.asr.2021.04.024