

Meteorolojik Parametrelerin GNSS Yansıma Sinyallerine Etkisinin İncelenmesi

Investigating the Effect of Meteorological Parameters on GNSS Reflection Signals

Cansu Beşel Hatipoğlu^{1*}, Emine Tanır Kayıkcı²

¹Sinop Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 57000, Sinop/Türkiye.

²Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon/Türkiye.

ARAŞTIRMA MAKALESİ

*Sorumlu yazar:

Cansu Beşel Hatipoğlu
cbesel@sinop.edu.tr

doi: 10.48123/rsgis.1487035

Yayın süreci

Geliş tarihi: 20.05.2024
Kabul tarihi: 02.09.2024
Basım tarihi: 26.09.2024

Özet

Günümüzde yaklaşık altı yüz milyon insan kıyıya yakın alanlarda yaşam sürdürmektedir. Bu nedenle deniz seviyesi değişiminin izlenmesi ve meydana gelebilecek olayların değerlendirilmesi son derece önemli olmaktadır. Deniz seviyesi değişiminin izlenmesinde yersel ve uydu tabanlı olmak üzere farklı yöntemler kullanılmaktadır. Yansıyan GNSS sinyallerini kullanarak deniz seviyesi değişiminin izlenmesine olanak sağlayan Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri İnterferometrik Reflektometri (GNSS-IR) tekniği de bu yöntemlerden biridir. Bu çalışma ile deniz yüzeyinden yansıyan GNSS sinyallerine meteorolojik parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında, Sinyal Gürültü Oranı (Signal-to-Noise Ratio-SNR) verisi ve hava basıncı, rüzgar ve sıcaklık meteorolojik parametreleri kullanılmıştır. SNR verisi, Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Servisi'ne (TUDES) bağlı mareograf istasyonu ile ortak yerleşkeli TRBZ sabit GNSS istasyonundan sağlanmıştır. Hava basıncı verisi TUDES üzerinden alınmış olup sıcaklık ve rüzgar hızı verileri ERA5 veri setinden alınmıştır. Meteorolojik parametrelerin yansıyan sinyaller üzerindeki etkisini incelemek için hava basıncı, rüzgar hızı ve sıcaklık parametreleri ile trendden arındırılmış SNR genlikleri Basit Doğrusal Regresyon ve Mann-Kendall testi kullanılarak karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara bakıldığında; sıcaklık ve rüzgar hızı parametreleri ile trendden arındırılmış SNR genliklerinin aynı yönde eğilime sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Deniz seviyesi değişimi, Sinyal gürültü oranı, Meteorolojik parametreler, Basit doğrusal regresyon, Mann-Kendall test

Abstract

Today, about six hundred million people live in coastal areas. Hence, it is extremely important to monitor sea level changes and assess possible events. Sea level changes are monitored using different methods both on the ground-based and satellite-based. One such method is the Global Navigation Satellite System Interferometric Reflectometry (GNSS-IR) technique, which uses reflected GNSS signals to monitor sea level changes. This study investigates the impact of meteorological parameters on GNSS signals reflected from the sea surface. Signal-to-noise ratio (SNR) data and meteorological parameters of air pressure, wind, and temperature are used in this study. SNR data are provided from the TRBZ co-located GNSS station operated by the Turkish National Sea Level Monitoring System (TUDES). The air pressure data are obtained from TUDES, while the temperature and wind speed data are from the ERA5 dataset. To examine the effect of meteorological parameters on the reflected signals, air pressure, wind speed, and temperature parameters and detrended SNR amplitudes are compared using Simple Linear Regression and the Mann-Kendall test. As a result of the study, it was observed that temperature and wind speed parameters and detrended SNR amplitudes had the same trend.

Keywords: Sea level changes, Signal-to-noise ratio, Meteorological parameters, Simple linear regression, Mann-Kendall test

1. Giriş

Küresel Navigasyon Uydu Sistemleri (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) antenleri uydudan gelen doğrudan sinyalleri almak ve istasyonun etrafından gelen beklenmedik yansıyan sinyalleri bastırmak üzere tasarlanmıştır. Fakat yansıyan GNSS sinyallerinin bir kısmı antene ulaşarak doğrudan gelen sinyal ile girişim yapmaktadır. Bunun sonucunda ise sinyal yansıma etkisi (multipath) ortaya çıkmaktadır. GNSS sinyal yansıması açık görüş hattından (Line-of-Sight, LOS) gelen sinyal ve bir veya birden fazla kez yakınlardaki engellerden yansıyarak gelen sinyallerin (Non-Line-of-Sight, NLOS) bileşkesi olmaktadır (Braasch, 2017). Sinyal yansıma etkisi yüksek doğruluklu konumlamada büyük hata kaynaklarından biri olup GNSS gözlemlerinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu etkinin azaltılması ve modellenmesine yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmektedir (Georgiadou & Kleusberg, 1988; Elosegui vd., 1995; Bilich vd., 2008; Lu vd., 2021; Moradi vd., 2015).

Zaman içerisinde, sinyal yansıma etkisinin yeryüzünün uzaktan algılanmasında yararlı olabileceği görülmüştür. Martin-Neira (1993), Pasif Reflektometri ve İnterferometri Sistemi (Passive Reflectometry and Interferometry System, PARIS) için yansıyan GNSS sinyallerinin okyanusların uzaktan algılanmasında kullanılmasını göstermiştir. Böylece yersel ve uydu tabanlı GNSS Reflektometri (GNSS-R) araştırma alanının gelişmesinin temelleri atılmıştır. Katzberg ve Garrison (1996), okyanuslarda daha iyi bir iyonosferik düzeltme sağlamak için Küresel Konumlama Sistemi (Global Positioning System, GPS) sinyal yansımalarının kullanılmasını önermiştir. Ayrıca Katzberg vd. (1999) okyanus yüzeyi üzerindeki hava araçlarının yüksekliğini tahmin etmek için GPS sinyal yansımalarından bazı örnekler sunmuştur. Uydu tabanlı GNSS-R uygulamalarının yanı sıra tek jeodezik alıcı ile yersel tabanlı çalışmalar da yapılmaktadır. Burada, doğrudan gelen sinyal ile yansıyan sinyal tek jeodezik alıcıda birleştiğinden GNSS İnterferometrik Reflektometri (GNSS-IR) kavramı kullanılmaktadır. GNSS-IR tekniğinin farklı kullanım alanları mevcuttur. Başlıca; (1) deniz seviyesi değişimi (Beşel & Tanır Kayıkçı, 2022; Altuntaş & Tunalıoğlu, 2022; Geremia-Nievinski vd., 2020; Larson vd., 2013; Larson vd., 2017; Tabibi vd., 2021; Wang vd., 2018), (2) kar kalınlığı (Durand vd., 2019; Larson & Nievinski, 2013; Zhang vd., 2021), (3) toprak nemi (Larson vd., 2008; Vey vd., 2016), (4) buz kalınlığı (Ghiasi vd., 2020) ve (5) ekstrem doğa olaylarının belirlenmesi (Karegar vd., 2020; Kim & Park, 2021; Larson vd., 2021) gibi alanlarda kullanılmaktadır. Deniz seviyesi değişiminin belirlenmesinde yer merkezli GNSS-IR kullanımı ise ilk kez Larson vd. (2013) tarafından SNR verilerini kullanarak rölatif deniz seviyesi değişimini belirlemek için sunulmuştur.

GNSS-IR ile deniz seviyesi değişiminin izlenmesinde yansıma sinyallerini etkileyen faktörler önemlidir. Deniz yüzeyi pürüzlülüğü, yansıma sinyallerini etkileyen faktörlerden biridir (Asgarimehr vd., 2018; Ghiasi vd., 2021). Diğer yandan sıcaklık, rüzgar hızı, atmosferik basınç gibi meteorolojik parametreler deniz seviyesi değişimi üzerinde etkiye sahiptir. GNSS tabanlı deniz seviyesi değişimi açısından bakıldığında, bu meteorolojik parametrelerin oluşturacağı pürüzlülük yansıyan GNSS sinyalini etkileyen bir faktör olarak görülebilir. Dolayısıyla GNSS tabanlı deniz seviyesi kestirimi de bu durumdan etkilenmektedir. Meteorolojik parametrelerin yansıyan sinyal üzerindeki etkilerine bakıldığında; sıcaklığın artması ile birlikte deniz suyu sıcaklığı da artarak genişmekte ve deniz seviyesi yükselmekte olup çoğunlukla sıcaklıktaki artış SNR genliklerinin artmasına neden olmaktadır. Rüzgar hızı ise temelde suyun sürüklenmesine neden olup deniz yüzeyindeki sürüklenme kuvveti deniz seviyesini değiştirmektedir. Aynı zamanda deniz pürüzlülüğüne neden olması sebebiyle GNSS yansıyan sinyal üzerinde bir etkiye sahiptir. Diğer yandan atmosferik basınç deniz seviyesini etkileyen birinci faktör olup ters yönlü bir etkiye neden olmaktadır. Literatürde, meteorolojik parametrelerin yansıyan GNSS sinyali üzerindeki etkisinin incelenmesine yönelik oldukça az çalışmaya rastlanmıştır. Ghiasi vd. (2021), GNSS-IR ile buz kalınlığının belirlenmesinde sıcaklığın yansıyan GNSS sinyali üzerindeki etkisini araştırmıştır. Sıcaklık arttıkça saçılımın arttığı ve antene doğru yansımanın azalması sebebiyle SNR genliğinin de azaldığını görmüştür. GNSS-IR tekniği ile deniz seviyesi değişiminin belirlenmesinde meteorolojik parametrelerin yansıyan GNSS sinyali üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmaya henüz rastlanmamıştır.

Bu çalışma ile deniz seviyesi değişimini etkileyen sıcaklık, rüzgar hızı ve atmosferik basınç meteorolojik parametrelerinin GNSS yansıma sinyali üzerindeki etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında iki tür veri kullanılmıştır. Birinci tür veri SNR olup TUDES ağında mareograf istasyonu ile ortak yerleşkeli TRBZ sabit GNSS istasyonundan alınmıştır. İkinci tür veri ise meteorolojik parametrelerdir. Burada hava basıncı verisi TUDES üzerinden, sıcaklık ve rüzgar hızı verisi ise ERA5 veri setinden sağlanmıştır. Meteorolojik parametrelerin GNSS yansıma sinyalleri üzerindeki etkisini incelemek için trendden arındırılmış SNR genlikleri ile meteorolojik parametrelerin zaman içerisinde göstermiş olduğu eğilim belirlenmiş olup elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bunun için, Basit Doğrusal Regresyon ve Mann-Kendall trend testleri uygulanmıştır. Çalışmada son olarak TRBZ istasyonunda GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi değişimi belirlenmiş olup hem GNSS-IR hem de mareograf deniz seviyesi verileri ile meteorolojik parametreler arasındaki ilişki incelenmiştir. Böylelikle yansıyan GNSS sinyali ve bu sinyal kullanılarak elde edilen GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi ile meteorolojik parametrelerin ilişkisi birlikte değerlendirilmiştir.

2. Yöntem

Çalışma kapsamında trendden arındırılmış SNR genlikleri ile meteorolojik parametrelerin karşılaştırılmasında Basit Doğrusal Regresyon ve Mann-Kendall trend testleri kullanılmıştır. Aşağıda yöntemlere ait detaylar verilmiştir.

2.1. Basit Doğrusal Regresyon

Basit doğrusal regresyon modeli, x bağımsız değişkeni ile y bağımlı değişkeni arasındaki ilişkiyi doğrusal bir fonksiyonla ifade etmektedir. Regresyon modeli,

$$y_i + v_i = a_0 + a_1x_i \quad (1)$$

şekindedir. Burada; a_1 ; eğim, a_0 ; kesişim sabiti ve v_i ($i = 1, 2, \dots, n$) bağımlı değişkenin gerçek değeri ile modelden elde edilen değer arasındaki farkı ifade eden düzeltme parametresini ifade etmektedir. n sayıda veri için Eşitlik (1),

$$\begin{aligned} y_1 + v_1 &= a_0 + a_1x_1 \\ y_2 + v_2 &= a_0 + a_1x_2 \\ y_3 + v_3 &= a_0 + a_1x_3 \\ &\vdots \\ y_n + v_n &= a_0 + a_1x_n \end{aligned} \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlik (2)'nin matris gösterimi,

$$V = Ax - y \quad (3)$$

şekindedir. Eşitlik(3)'te, A katsayılar matrisi,

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & 1 \\ x_2 & 1 \\ x_3 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x_n & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Bilinmeyenler vektörü,

$$x = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Sabitler vektörü,

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

Düzeltilmeler vektörü,

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

şeklinde gösterilmektedir. En Küçük Kareler (EKK) ilkesine göre,

$$x = (A^T A)^{-1} (A^T y) \quad (8)$$

olarak elde edilen simetrik katsayılı denklem sisteminin çözümünden x bilinmeyenler vektörünün elemanları,

$$\begin{aligned} a_1 &= x(1) \\ a_0 &= x(2) \end{aligned} \quad (9)$$

şeklinde hesaplanır (Öztürk & Şerbetçi, 1992; Beşel, 2017).

2.2. Mann-Kendall Testi

Parametrik olmayan yöntemlerden biri olan Mann-Kendall testi, hidroloji ve klimatoloji gibi alanlarda zaman serilerindeki trendin belirlenmesinde sıklıkla kullanılmaktadır. Uygulanan hipotez testi ile zaman serisindeki trend varlığı ve yönü araştırılmaktadır. Mann-Kendall test değeri,

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (10)$$

olarak hesaplanır. Burada, n ; ölçü sayısını ifade etmekte olup sgn işaret fonksiyonudur. Mann-Kendall testi x_k ($k = 1, \dots, n - 1$) ve x_j ($j = i + 1, \dots, n$) veri setlerine uygulanır. Eşitlik (10)'daki sgn işaret fonksiyonu değeri x_j ve x_k değerlerinin,

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1; & x_j > x_k \\ 0; & x_j = x_k \\ -1; & x_j < x_k \end{cases} \quad (11)$$

şeklinde kıyaslanması ile bulunur. S değerinin varyansı,

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (12)$$

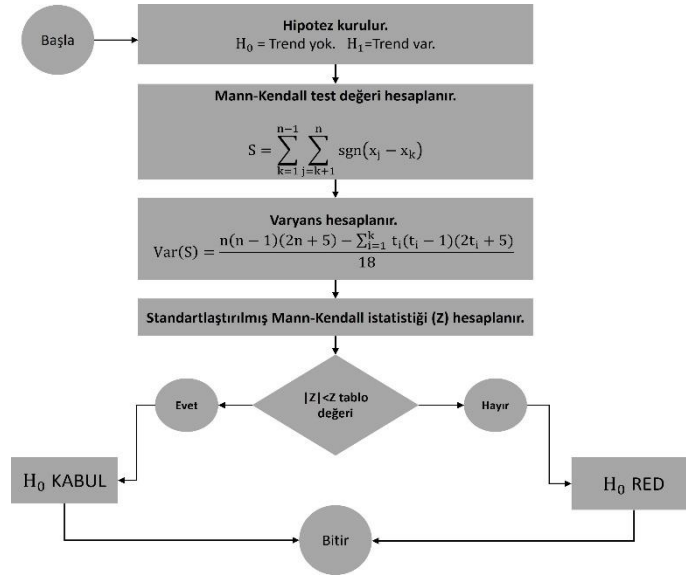
olarak hesaplanır. Diğer yandan, seride aynı değere sahip veriler mevcut ise varyans,

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^k t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (13)$$

şeklinde hesaplanır. Eşitlik (13)'de k ; veri setindeki bağıl grupların sayısı, t_i değeri ise i uzunluğundaki bir seride bağı gözlemlerdir. Standartlaştırılmış Mann-Kendall istatistiği Z ise,

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}; & S > 0 \\ 0; & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}; & S < 0 \end{cases} \quad (14)$$

şeklinde hesaplanır. Ardından, %95 istatistik güvenle ($Z_{(1-\alpha/2)}$) hesaplanan standart normal dağılım tablo değeri (Z_{tablo}) ile Standartlaştırılmış Mann-Kendall istatistiği (Z) karşılaştırılır. Buna göre; $|Z| < Z_{\text{tablo}}$ ise H_0 hipotezi kabul edilir. Yani seride trend yoktur. Eğer $|Z| > Z_{\text{tablo}}$ ise H_0 hipotezi reddedilir. Bu durumda serinin trende sahip olduğu sonucuna varılır. Eğer S değeri pozitif ise artan yönde trend, negatif ise azalan yönde trend mevcuttur (Mann, 1945; Kendall, 1975; Beşel & Tanır Kayıkçı, 2019). Şekil 1'de Mann-Kendall testine ait iş akış şeması sunulmuştur.

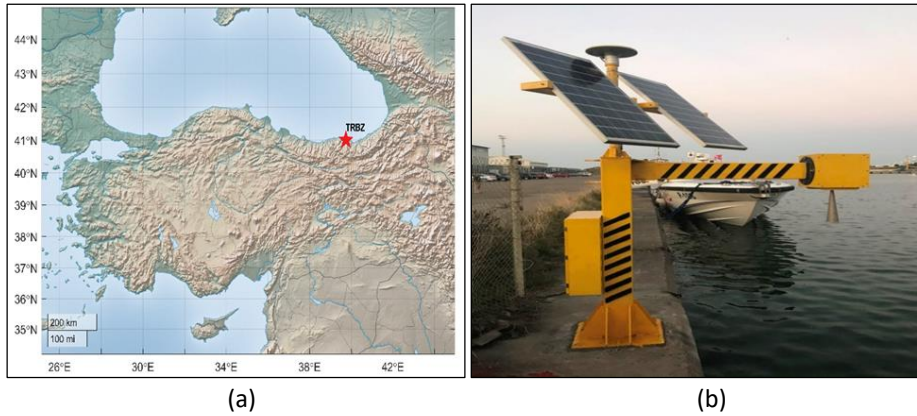


Şekil 1. Mann-Kendall testi iş akış şeması

3. Uygulama

3.1. Çalışma Alanı ve Veri

Bu çalışmada; TUDES ağında mareograf istasyonu ile ortak yerleşkeli Doğu Karadeniz kıyısı, Trabzon ilinde bulunan TRBZ sabit GNSS istasyonu kullanılmıştır (Şekil 2). TRBZ istasyonu; Trimble alıcı ve TRM39105.00 anten donanımına sahiptir. Çalışma kapsamında GPS L1 sinyaline ait SNR verileri kullanılmış olup veri zaman aralığı Temmuz 2019 - Ağustos 2020 olarak seçilmiştir. Veri kayıt aralığı ise 30 saniyedir.



Şekil 2. a) İstasyon konumu, b) TRBZ istasyonu

Yansıyan GNSS sinyalleri üzerindeki meteorolojik parametrelerin etkisini incelemek için hava basıncı, sıcaklık ve rüzgar hızı verileri kullanılmıştır. Hava basıncı verisi TUDES (TUDES, 2022) üzerinden sağlanmış olup veri kayıt aralığı 15 dakikadır. Sıcaklık ve rüzgar hızı verileri ise ERA5 veri seti (Climate Data Store, 2021) üzerinden saatlik olarak alınmıştır. Doğrulama verisi olarak kullanılan TRBZ istasyonuna ortak yerleşkeli ve radar sensörlü sisteme sahip olan Trabzon mareograf istasyonu verileri TUDES (TUDES, 2022) üzerinden 15 dakika veri kayıt aralığı ile temin edilmiştir.

3.2. Veri Analizi

Çalışmada öncelikle TRBZ sabit GNSS istasyonunun bulunduğu bölgede sadece denizden yansıyan sinyalleri almak amacıyla denizel alanı kapsayacak şekilde uydu yükseklik açısı ve azimut aralıkları belirlenmiştir (Tablo 1). Bu nedenle uydu yükseklik açısı aralığı 5°-15°, azimut aralığı ise 85°-160° olarak seçilmiştir.

Belirlenen aralıklardaki tüm uydular yükselen ve alçalan uydu geçişleri olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Ardından bu gruplarda bulunan tüm uydu izlerine ait SNR verileri analiz edilmiştir.

Tablo 1. TRBZ istasyonu azimut ve uydu yükseklik açısı aralıkları

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

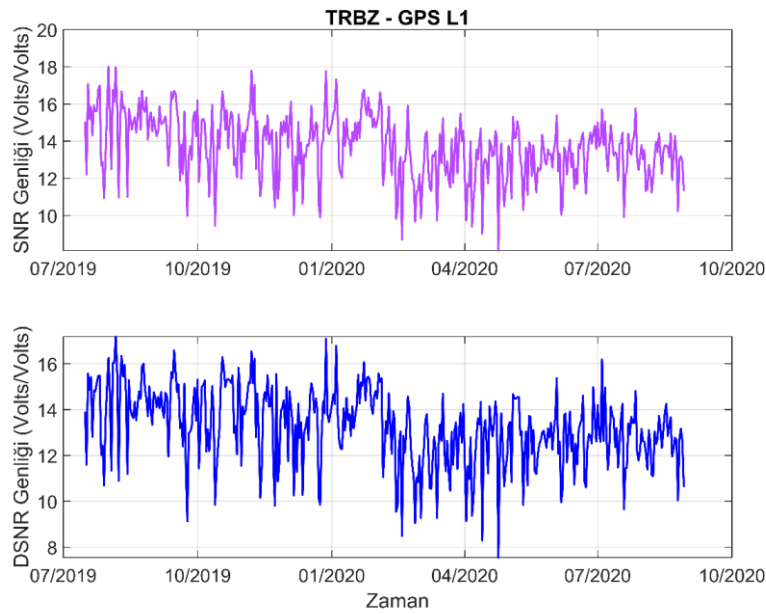
SNR, sinyal gücünün gürültü gücüne oranı olarak tanımlanmakta olup,

$$SNR = \frac{C/N_0}{B} \quad (15)$$

şeklinde hesaplanır. GNSS antenleri genellikle doğrudan gelen sinyali daha güçlü, yansıyan sinyali ise daha zayıf olacak şekilde tasarlanmıştır. Dolayısıyla SNR gözlemlerinde doğrudan gelen sinyalin katkısı, yansıyan sinyalin katkısına göre daha büyüktür. Bu nedenle doğrudan gelen sinyalin etkisinin kaldırılması gerekmektedir. Bu etkiyi kaldırmak ve sadece yansıyan GNSS sinyalini kullanmak için SNR verisine düşük dereceli polinom uygulanarak doğrudan gelen GNSS sinyalinin etkisi veri setinden çıkarılmaktadır. Bunun sonucunda trendden arındırılmış SNR verileri (δ SNR) elde edilmektedir. δ SNR için sinyal yansıma etkisi salınımları,

$$\delta SNR = A \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin(\theta) + \phi\right) \quad (16)$$

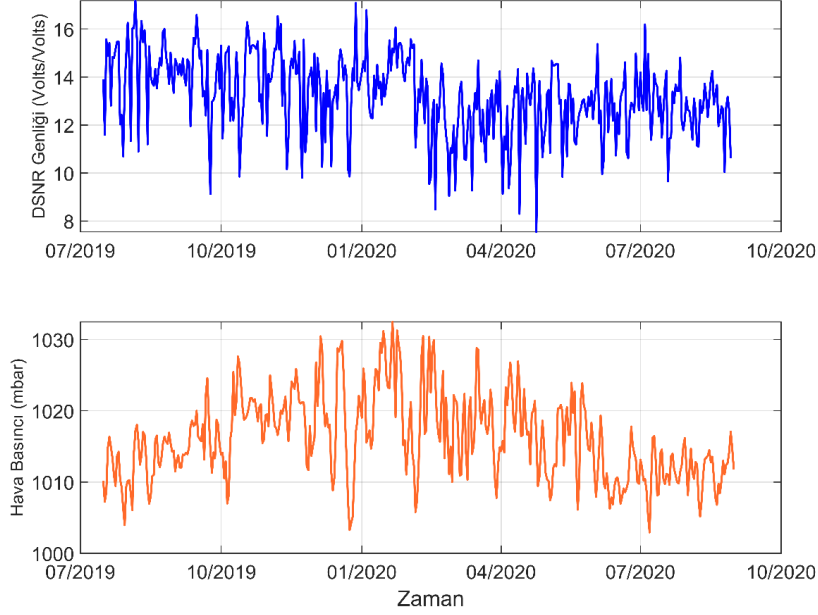
şeklinde dir. Eşitlik (16)'da, A; genlik, h; anten faz merkezi ile yansıma yüzeyi arasındaki düşey mesafe (reflektör yüksekliği), λ ; GNSS taşıyıcı dalga boyu, θ ; uydu yükseklik açısını, ϕ ; faz ofsetidir (Larson vd., 2013). Şekil 3'te TRBZ sabit GNSS istasyonuna ait SNR ve δ SNR genlikleri gösterilmiştir. Şekil 3'e göre, SNR genliği 8.1112 Volts/Volts ile 18.0069 Volts/Volts arasında değişmekte iken δ SNR genliği 7.5446 Volts/Volts ile 17.1824 Volts/Volts arasındadır.



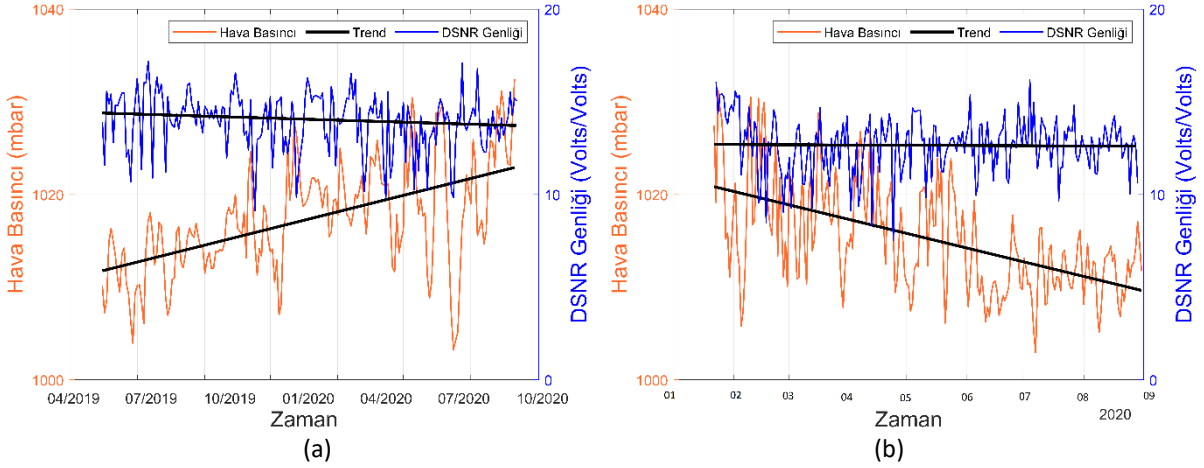
Şekil 3. SNR ve δ SNR genlikleri

δ SNR genliği hesaplandıktan sonra hava basıncı, rüzgar hızı ve sıcaklık parametreleri ile ilişkisi incelenmiştir. Bu aşamada hava basıncı, rüzgar hızı ve sıcaklık verileri günlük verilere dönüştürülmüştür. Aşağıda öncelikle Basit Doğrusal Regresyon analizinden elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Şekil 4'te δ SNR genliği ve hava basıncı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Hava basıncı verisi ~1002 mbar ila 1032 mbar arasında değişmektedir. Burada zaman serisinin genel seyrine bakıldığında artan ve azalan yönde trendler içerdiği görülmüştür. Bu nedenle seri iki ayrı parçaya bölünerek parçalı trend analizi ile ayrı ayrı değerlendirmeye alınmıştır (Şekil 5).

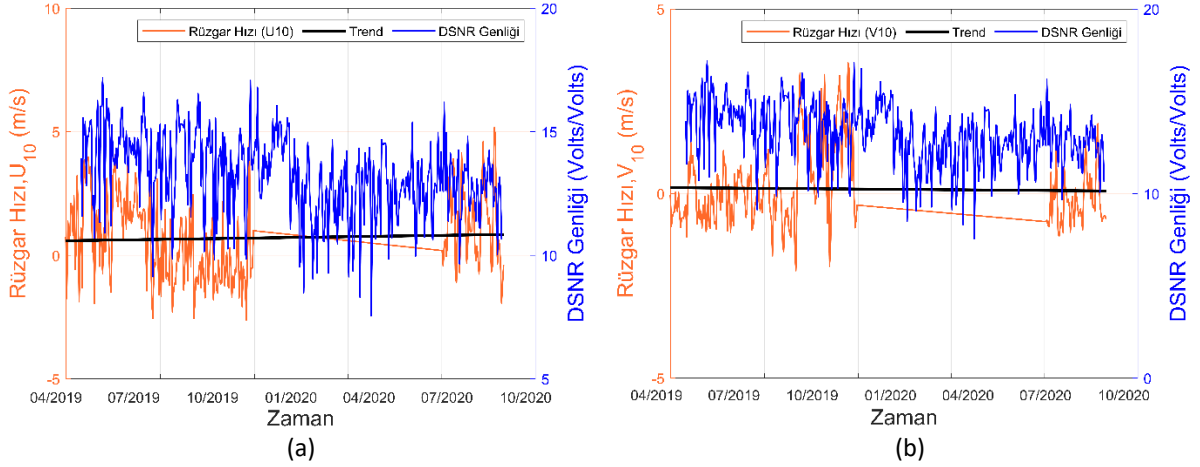


Şekil 4. δ SNR genliği ve hava basıncı ilişkisi



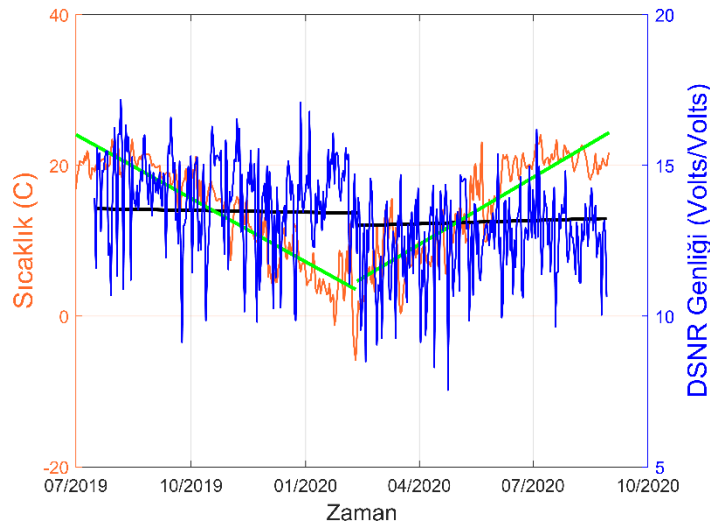
Şekil 5. δ SNR genliği ve hava basıncı ilişkisi: (a) birinci dönem, (b) ikinci dönem

Şekil 5(a)'ya bakıldığında, Temmuz 2019-Şubat 2020 döneminde hava basıncında artan yönde trend, δ SNR genliğinde ise azalan yönde trend gözlemlenmiştir. Şekil 5(b)'de ise Şubat 2020-Eylül 2020 dönemine gelindiğinde ise hava basıncında azalan yönde trend mevcutken δ SNR genliğinde artan yönde trend mevcuttur.



Şekil 6. δSNR genliği ve rüzgar hızı ilişkisi: a) doğu yönündeki rüzgar hızı, b) kuzey yönündeki rüzgar hızı

Şekil 6'da doğu yönündeki (U10) ve kuzey yönündeki (V10) rüzgar hızları ile δSNR ilişkisi sunulmuştur. Buna göre, doğu yönündeki rüzgar hızı (U10) ile δSNR genliği arasında aynı yönde bir eğilim vardır. Diğer yandan kuzey yönündeki rüzgar hızında ise trend yoktur.



Şekil 7. δSNR genliği ve sıcaklık ilişkisi

Son olarak δSNR genliği ile sıcaklık ilişkisi incelenmiştir (Şekil 7). Burada zaman serisi iki ayrı döneme bölünerek parçalı trend analizi yapılmıştır. Buna göre; Temmuz 2019-Şubat 2020 döneminde sıcaklık ve δSNR genliğinde azalan yönde trend varken Şubat 2020-Eylül 2020 döneminde ise sıcaklık ve δSNR genliğinde artan yönde trend vardır.

Diğer yandan meteorolojik parametrelerinin zaman içerisinde gösterdiği eğilim ile δSNR genliği arasındaki ilişkiye Mann-Kendall trend analizi kullanılarak bakılmıştır. Mann-Kendall trend analizinde öncelikle Mann-Kendall test değeri (Z) hesaplanmış olup %95 istatistik güvenle elde edilen standart normal dağılım tablo değeri ile karşılaştırılarak trend olup olmadığı belirlenmiştir. Aşağıda her bir meteorolojik parametre ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 2. δ SNR ve hava basıncı Mann-Kendall trend analizi

	Veri	Standartlaştırılmış Mann-Kendall İstatistiği (Z)	Standart Normal Dağılım Tablo Değeri ($\alpha=0.05$)	Trend	Trend Yönü
1. DÖNEM	Hava basıncı	-2.0315	1.96	Trend var	Artan
	δ SNR	-2.7796	1.96	Trend var	Azalan
2. DÖNEM	Hava basıncı	2.2118	1.96	Trend var	Azalan
	δ SNR	2.2711	1.96	Trend var	Artan

Tablo 2’de hava basıncı ve δ SNR verilerine uygulanan Mann-Kendall trend analizi sonuçları verilmiştir. Birinci dönemde hava basıncında artan yönde trend varken δ SNR verilerinde azalan yönde trend, ikinci dönemde ise hava basıncında azalan yönde trend, δ SNR genliğinde ise artan yönde trend görülmüştür.

Tablo 3. δ SNR ve rüzgar hızı Mann-Kendall trend analizi

Veri	Standartlaştırılmış Mann-Kendall İstatistiği (Z)	Standart Normal Dağılım Tablo Değeri ($\alpha=0.05$)	Trend	Trend Yönü
Rüzgar Hızı (V10)	1.8757	1.96	Trend yok	-
Rüzgar Hızı (U10)	-2.0848	1.96	Trend var	Azalan
δ SNR	-8.3576	1.96	Trend var	Azalan

Tablo 3’te rüzgar hızı ve δ SNR verilerine uygulanan Mann-Kendall trend analizi sonuçları gösterilmiştir. Burada, kuzeye bakan rüzgar hızında (V10) herhangi bir trend yok iken doğuya bakan rüzgar hızında (U10) azalan yönde trend görülmüştür. Aynı şekilde δ SNR genliği de zaman içerisinde azalan yönde bir eğilim göstermiştir.

Tablo 4. δ SNR ve sıcaklık Mann-Kendall trend analizi

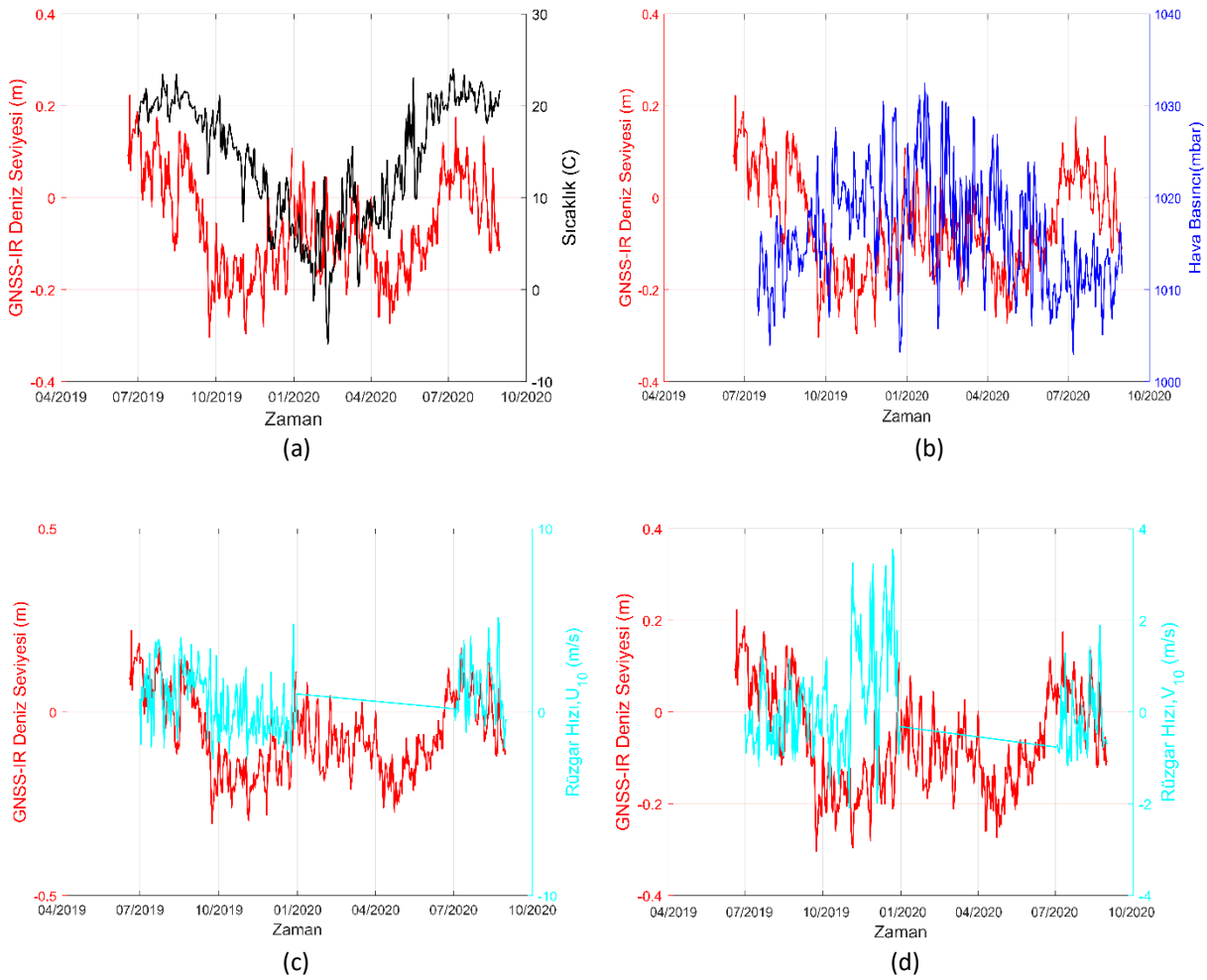
	Veri	Standartlaştırılmış Mann-Kendall İstatistiği (Z)	Standart Normal Dağılım Tablo Değeri ($\alpha=0.05$)	Trend	Trend Yönü
1. DÖNEM	Sıcaklık	-14.6121	1.96	Trend var	Azalan
	δ SNR	-2.7796	1.96	Trend var	Azalan
2. DÖNEM	Sıcaklık	15.5262	1.96	Trend var	Artan
	δ SNR	2.2711	1.96	Trend var	Artan

Tablo 4’te sıcaklık ve δ SNR verilerine uygulanan Mann-Kendall trend analizi sonuçları sunulmuştur. Burada, birinci dönemde sıcaklık ve δ SNR verilerinde azalan yönde trend mevcutken ikinci dönemde ise artan yönde trend mevcuttur. Mann-Kendall trend analizinde trend büyüklüğünün belirleyicisi olan Standartlaştırılmış Mann-Kendall İstatistiğine (Z)

bakıldığında, en büyük Z değeri 15.5262 ile ikinci dönem sıcaklık verilerinde elde edilmiştir. En küçük Z değeri ise kuzeye bakan rüzgar hızında (V10) görülmüştür.

Çalışmada her bir meteorolojik parametre ve δ SNR verilerine uygulanan Basit Doğrusal Regresyon ve Mann-Kendall testleri ile elde edilen trendlerin genel olarak aynı yönde olduğu görülmüştür. Her iki yöntemde sıcaklık arttıkça δ SNR genliği de artan yönde eğilim göstermiştir. Tersi durumda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Rüzgar hızında ise; doğuya bakan rüzgar hızında (U10) Basit Doğrusal Regresyon analizinde artan yönde Mann-Kendall testinde ise azalan yönde trend bulunmuştur. δ SNR genliği trendleri de her iki yöntemde doğuya bakan rüzgar hızı (U10) ile aynı yönde eğilim göstermiştir. Kuzeye bakan rüzgar hızında (V10) ise her iki yöntemde de trend bulunamamıştır. Hava basıncı parametresine bakıldığında, her iki yöntemde de aynı yönde trendler elde edilmiştir.

Yansıyan GNSS sinyali ile meteorolojik parametrelerin eğilimleri incelendikten sonra yine yansıyan GNSS sinyalleri kullanılarak hesaplanan GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi verileri ile karşılaştırma yapılmıştır. Bunun için TRBZ istasyonu δ SNR verilerine uygulanan Lomb-Scargle periyodogramı ile en yüksek spektral güce karşılık gelen baskın frekans belirlenerek ve $H = \frac{\lambda f}{2}$ kullanılarak anten faz merkezi ile yansıma yüzeyi arasındaki düşey mesafe (reflektör yüksekliği) hesaplanmıştır. Burada λ ; GNSS taşıyıcı dalga boyu, f ; frekansı ifade etmektedir. Reflektör yüksekliklerinin GNSS anteninin ortometrik yüksekliğinden farkı alınarak GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi belirlenmiştir. Şekil 8'de GNSS-IR tekniğine dayalı deniz seviyesi ve meteorolojik parametreler ilişkisi gösterilmiştir. Meteorolojik parametrelerin deniz seviyesi değişimi üzerindeki etkisinden Bölüm 1'de bahsedilmiş olup burada da destekler nitelikte sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle sıcaklık ve hava basıncı ile olan ilişki açıkça görülmektedir. Sıcaklık azaldıkça GNSS-IR deniz seviyesi değişiminin azalmış olup tersi durumda da aynı yönde bir değişim göstermiştir. Hava basıncı ile ters yönlü bir ilişki olduğu görülmüştür.



Şekil 8. GNSS-IR deniz seviyesi ve meteorolojik parametreler (a) sıcaklık, b) hava basıncı, c) rüzgar hızı U₁₀; d) rüzgar hızı V₁₀)

Çalışmada GNSS-IR tekniğine dayalı olarak elde edilen deniz seviyesi verilerinin yanında doğrulama yapmak için mareograf verileri de kullanılmış olup meteorolojik parametrelerin her iki veri seti ile arasındaki ilişki belirlenmiştir. Bunun için Pearson ve Spearman korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Pearson korelasyon katsayısı,

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)\sigma_x\sigma_y} \quad (17)$$

şeklinde hesaplanmıştır. Burada, n ; veri çiftlerini (x_i, y_i) , \bar{x} ve \bar{y} ; değişkenlerin ortalamalarını, σ_x ve σ_y ise değişkenlerin standart sapmalarını ifade etmektedir (Tüysüz & Yaylalı Abanuz, 2012). Spearman korelasyon katsayısı,

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (18)$$

olarak hesaplanmıştır. Burada, d_i ; x_i ve y_i değişkenlerinin küçükten büyüğe doğru sıra sayıları arasındaki farklarının kareleri, n ; veri sayısıdır (Gamgam & Altunkaynak, 2013). Tablo 5'te sırasıyla GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi verileri ile meteorolojik parametreler arasında hesaplanan korelasyon katsayıları verilmiştir.

Tablo 5. GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi ile meteorolojik parametreler ilişkisi

Deniz Seviyesi	Korelasyon	Sıcaklık		Hava Basıncı		Rüzgar Hızı	
		1.Dönem	2.Dönem	1.Dönem	2.Dönem	U10	V10
GNSS-IR	Pearson	0.42	0.52	-0.24	-0.29	0.56	-0.30
	Spearman	0.38	0.39	-0.27	-0.32	0.56	-0.23
Mareograf	Pearson	0.43	0.53	-0.21	-0.30	0.56	-0.31
	Spearman	0.44	0.43	-0.26	-0.33	0.55	-0.25

Tablo 5'e bakıldığında, hem GNSS-IR hem de mareograf verilerinin sıcaklık verileri ile orta düzeyde ilişkide olduğu görülmüştür. En yüksek korelasyon 0.53 Pearson korelasyonu katsayısı ile mareograf ve sıcaklık arasında 2. dönemde hesaplanmıştır. En düşük korelasyon ise 0.38 Spearman korelasyon katsayısı ile GNSS-IR deniz seviyesi ve sıcaklık arasında 1.dönemde elde edilmiştir. Hava basıncı verileri ile hem GNSS-IR hem de mareograf verilerinin negatif yönde ve düşük düzeyde ilişkide olduğu görülmüştür. GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi verilerinin doğu yönündeki (U10) rüzgar hızı ile orta düzeyde, kuzey yönündeki (V10) rüzgar hızı ile negatif yönde ve düşük düzeyde ilişkide olduğu görülmüştür. En yüksek korelasyon hem GNSS-IR hem de mareograf verileri ile 0.56 ile doğu yönündeki (U10) rüzgar hızında elde edilmiştir. Bu çalışmada Temmuz 2019 - Ağustos 2020 periyodundaki deniz seviyesi verileri ile meteorolojik parametreler arasında hesaplanan korelasyonlara bakıldığında yüksek düzeyde bir ilişki bulunmamıştır.

4. Sonuçlar

GNSS-IR tekniğinin deniz seviyesi değişiminde kullanımı, sağladığı avantajlar dolayısıyla kıymetlidir. Bununla birlikte teknik geliştirilmeye de açıktır. GNSS-IR tekniğinin deniz seviyesi değişiminde kullanımı; düşey yer kabuğu hareketinden etkilenmemesi, kurulum ve bakım maliyeti, mareograf istasyonuna göre kıydan itibaren daha geniş bir bölgedeki deniz seviyesini algılama potansiyeli ve Uluslararası Yersel Referans Ağı'na (ITRF) göre deniz seviyesi değişiminin belirlenmesine imkan sağlaması gibi birtakım avantajları dolayısıyla önemli olmakla beraber deniz seviyesi değişiminin izlenmesinde bir potansiyeldir. Dolayısıyla elde edilen sonuçların doğruluk ve güvenilirliğini artırmak için GNSS-IR tekniğine etki eden faktörlerin belirlenmesi önemlidir. Yüze pürüzlülüğü yansıyan GNSS sinyali etkileyen bir faktördür. Bu çalışmada TRBZ sabit GNSS istasyonunun bulunduğu alanda pürüzlülüğe neden olabilecek hava basıncı, sıcaklık ve rüzgar hızı meteorolojik parametrelerinin yansıyan GNSS sinyali üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Basit Doğrusal Regresyon ve Mann-Kendall trend analizi yöntemleri uygulanarak meteorolojik parametreler ve δ SNR genliğinin zaman içerisinde gösterdiği eğilim değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında, sıcaklık arttıkça δ SNR genliğinin arttığı görülmüştür. Bu durum artan sıcaklıkla beraber saçınım arttığı ve antene doğru olan yansımaların azaldığı şeklinde yorumlanabilir. Diğer yandan hava basıncındaki azalma ile de δ SNR genliğinin arttığı tespit edilmiştir. Son olarak GNSS-IR ve mareograf deniz seviyesi ile meteorolojik parametreler arasındaki ilişki Pearson ve Spearman korelasyonları hesaplanarak incelenmiş olup parametreler arasında orta düzeyde ilişkiler bulunmuştur. Bu çalışmada meteorolojik parametreler ve yansıyan GNSS sinyalleri arasındaki ilişki bölgesel olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara bakıldığında aralarında kesin bir ilişki görülmemiştir. Bu nedenle kesin bir etkiden de bahsedilmesi mümkün olmamaktadır. İleride yapılacak olan daha kapsamlı çalışmalarla bu ilişkinin derinlemesine incelenmesi mümkündür.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan TRBZ sabit GNSS istasyonu verileri Karadeniz Teknik Üniversitesi ve Harita Genel Müdürlüğü arasında yürütülen “Karadeniz Kıyılarındaki Deniz Seviyesi Değişiminin GNSS-IR Tekniği ile 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 (<https://tudes.harita.gov.tr/Portal/>) üzerinden temin edilmiştir.

Kaynaklar

- Altuntaş, C., & Tunalıoğlu, N. (2022). Deniz seviyesi değişimlerinin belirlenmesinde GNSS-IR yönteminin kullanımı ve doğruluk analizi üzerine bir araştırma. *Geomatik*, 7(3), 187-196.
- Asgarimehr, M., Zavorotny, V., Wickert, J., & Reich, S. (2018). Can GNSS reflectometry detect precipitation over oceans?. *Geophysical Research Letters*, 45(22), 585-592.
- Beşel, C., & Kayıkçı, E. T. (2022). Determination of sea level variations in Turkish Mediterranean coast using GNSS reflectometry. *Survey Review*, 54(385), 310–319. <https://doi.org/10.1080/00396265.2021.1939589>
- Beşel, C., & Tanır Kayıkçı, E. (2019). Serisel korelasyonun toplam zenit gecikmesi zaman serilerinde parametrik olmayan trend belirleme üzerindeki etkisi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1), 180-188.
- Beşel, C. (2017). *IGS istasyonları zenit troposferik gecikme parametresi zaman serilerinde trend ve mevsimsel etki analizleri* [Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi. <https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/>
- Bilich, A., Larson, K. M., & Axelrad, P. (2008). Modeling GPS phase multipath with SNR: case study from the Salar de Uyuni, Boliva. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(B4), Article B04401. <https://doi.org/10.1029/2007JB005194>
- Braasch, M.S. (2017). *Multipath*. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems.
- Climate Data Store. (2022, July). *Temperature and wind speed data*. Climate Data Store (CDS). <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
- Durand, M., Rivera, A., Nievinski, F., Lenzano, M. G., Monico, J. F. G., Paredes, P., & Lenzano, L. (2019). GPS reflectometry study detecting snow height changes in the Southern Patagonia Icefield. *Cold Regions Science and Technology*, 166, Article 102840. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102840>
- Elosegui, P., Davis, J. L., Jaldehag, R. T. K., Johansson, J. M., Niell, A. E., & Shapiro, I. I. (1995). Geodesy using the Global Positioning System: the effects of signal scattering on estimates of site position. *Journal of Geophysical Research*, 100(6), 2156-2202.
- Gamgam, H., & Altunkaynak, B. (2013). *SPSS uygulamalı parametrik olmayan yöntemler*. Seçkin Yayıncılık.
- Georgiadou, P.Y., & Kleusberg, A. (1988). On carrier signal multipath effects in relative GPS positioning. *Manuscripta Geodaetica*, 13(3),172-179.
- Geremia-Nievinski, F., Hobiger, T., Haas, R., Liu, W., Strandberg, J., Tabibi, S., Vey, S., Wickert, J., & 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), Article 70. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01387-3>
- Ghiasi, Y., Duguay, C. R., Murfitt, J., van der Sanden, J. J., Thompson, A., Drouin, H., & Prévost, C. (2020). Application of GNSS interferometric reflectometry for the estimation of lake ice thickness. *Remote Sensing*, 12(17), Article 2721. <https://doi.org/10.3390/RS12172721>
- Ghiasi, Y., Duguay, C., & Murfitt, J. (2021, March 29-31). *Temperature effect on reflected GNSS signals from mid-latitude lake ice* [Conference presentation]. The first workshop of the Inter-Commission Committee on Geodesy for Climate Research (ICCC), Potsdam, Germany.
- Karegar, M. A., Larson, K. M., Kusche, J., & Dixon, T. H. (2020). Novel quantification of shallow sediment compaction by GPS Interferometric Reflectometry and implications for flood susceptibility. *Geophysical Research Letters*, 47(14), Article e2020GL087807. <https://doi.org/10.1029/2020GL087807>
- Katzberg, S. J., & Garrison, J. L. (1996). *Utilizing GPS to determine ionospheric delay over the ocean* (Report Number NASA-TM-4750). NASA Langley Research Center. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19970005019>
- Katzberg, S. J., Garrison, J., & Howell, C. (1999, September 14-17). *Simple over-water altimeter using GPS reflections* [Meeting presentation], 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Nashville, Tennessee.
- Kendall, M.G., (1975). *Rank correlation methods*. Charles Griffin.
- Kim, S. K., & Park, J. (2021). Monitoring a storm surge during Hurricane Harvey using multi-constellation GNSS-Reflectometry. *GPS Solutions*, 25(2), Article 63. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01105-2>

- Larson, K. M., Lay, T., Yamazaki, Y., Cheung, K. F., Ye, L., Williams, S. D. P., & Davis, J. L. (2021). Dynamic sea level variation from GNSS: 2020 Shumagin earthquake tsunami resonance and hurricane Laura. *Geophysical Research Letters*, 48(4), Article e2020GL091378. <https://doi.org/10.1029/2020GL091378>
- Larson, K. M., Ray, R. D., & 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.
- Larson, K. M., Ray, R. D., Nievinski, F. G., & 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.
- Larson, K. M., Löfgren, J. S., & Haas, R. (2013). Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. *Advances in Space Research*, 51(8), 1301–1310. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.017>
- Larson, K. M., & Nievinski, F. G. (2013). GPS snow sensing: Results from the EarthScope plate boundary observatory. *GPS Solutions*, 17(1), 41–52. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0259-7>
- Larson, K. M., Small, E. E., Gutmann, E., Bilich, A., Axelrad, P., & Braun, J. (2008). Using GPS multipath to measure soil moisture fluctuations: Initial results. *GPS Solutions*, 12(3), 173–177. <https://doi.org/10.1007/s10291-007-0076-6>
- Lu, R., Chen, W., Dong, D., Wang, Z., Zhang, C., Peng, Y., & Yu, C. (2021). Multipath mitigation in GNSS precise point positioning based on trend-surface analysis and multipath hemispherical map. *GPS Solutions*, 25(3), Article 119. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01156-5>
- Mann, H. B. (1945). Non-parametric tests against trend. *The Econometric Society*, 3, 245-259.
- Martin-Neira, M. (1993). A Passive Reflectometry and Interferometry System (PARIS): application to ocean altimetry. *ESA Journal*, 17(4), 331-355.
- Moradi, R., Schuster, W., Feng, S., Jokinen, A., & Ochieng, W. (2015). The carrier-multipath observable: a new carrier-phase multipath mitigation technique. *GPS Solutions*, 19(1), 73-82.
- Öztürk, E., & Şerbetçi, M. (1992). *Dengeleme Hesabı III* (Yayın No. 144). Karadeniz Teknik Üniversitesi.
- Tabibi, S., Sauveur, R., Guerrier, K., Metayer, G., & Francis, O. (2021). SNR-based GNSS-R for coastal sea-level altimetry. *Geosciences*, 11(9), Article 391. <https://doi.org/10.3390/geosciences11090391>
- Tüysüz, N., & Yaylalı Abanuz, G. (2012). *Jeoistatistik: Kavramlar ve Bilgisayarlı Uygulamalar*. Karadeniz Teknik Üniversitesi Matbaası.
- TUDES. (2022, Haziran). *Deniz seviyesi*. Türkiye Ulusal Deniz Seviyesi İzleme Sistemi (TUDES). <https://tudes.harita.gov.tr/Portal/VeriSorgula>
- Vey, S., Güntner, A., Wickert, J., Blume, T., & 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.
- Wang, X., Zhang, Q., & Zhang, S. (2018). Water levels measured with SNR using wavelet decomposition and Lomb–Scargle periodogram. *GPS Solutions*, 22(1), Article 22. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0684-8>
- Zhang, S., Zhang, C., Zhao, Y., Li, H., Liu, Q., & Pang, X. (2021). Snow depth estimation based on GNSS-IR cluster analysis. *Measurement Science and Technology*, 32(9), Article 095801. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abee54>