

GNSS VERİLERİ VE NEQUICK2 MODELİ KULLANILARAK HORSESHOE ADASI (ANTARKTİKA) İYONOSFERİK LEVHA KALINLIĞI TAHMİNİ

Furkan Ali Küçük¹, M. Baran Ökten², Erhan Arslan¹, M. Oğuz Selbesoğlu³, H. Hakan Yavaşoğlu³,
Burcu Özsoy⁴

¹TÜBİTAK MAM Kutup Araştırmaları Enstitüsü, Kocaeli

²Warwick Üniversitesi, Füzyon, Uzay ve Astrofizik Merkezi, Fizik Bölümü, Coventry, Birleşik Krallık

³İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Geomatik Mühendisliği, İstanbul

⁴İstanbul Teknik Üniversitesi, Denizcilik Fakültesi, Deniz Ulaştırma Mühendisliği, İstanbul
furkan.kucuk@tubitak.gov.tr

Özet

İyonosferik levha kalınlığı, toplam elektron içeriği (TEC) F2 katmanı tepe elektron yoğunluğuna (NmF2) oranıdır ve iyonosferi temsil eden önemli bir parametredir. Bu çalışmada kullanılan veriler 67° 49' 54,3747" Güney enlemi, 67° 14' 17,0298" Batı boylamı Horseshoe Adası için elde edilmiştir TUR 1 GNSS alıcısından ve Küresel İyonosfer Radyo Gözlemeviden (GIRO) alınan TEC ve F2-bölgesinin kritik frekansının (foF2) verileri kullanılarak iyonosferik levha kalınlığındaki değişim hesaplanmıştır. Bununla birlikte NeQuick2 modeli kullanılarak ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, Aralık 2021'de seçili günlerde Güneş çevriminin minimum, jeomanyetik fırtınaların büyüklüğünü karakterize etmek için kullanılan Kp indeksinin 4 değerinde ve Dst indeksinin ise -30 nT'den küçük değerde olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, 2021 yılı aralık ayına aylık ortalama F10,7 cm gözlemlenen akı 102,94 sfu olarak hesaplanmıştır. Ancak, 27 Aralık 2021 tarihinde AE indeksinin 500 nT 'den büyük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun iyonosferik levha kalınlığı değişiminde etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ön bulgularımız Horseshoe Adası'nda gelecekte yapılacak iklim değişikliği ve uzay havası tahminlerinde için bir temel oluşturacaktır.

Anahtar Kelimeler: Antarktika, Toplam Elektron İçeriği, İyonosfer, Levha Kalınlığı, Güneş Aktivitesi

HORSESHOE ISLAND (ANTARCTICA) IONOSPHERIC THICKNESS ESTIMATION USING GNSS DATA AND NEQUICK2 MODEL

Abstract

Ionospheric plate thickness is the ratio of total electron content (TEC) to F2 layer peak electron density (NmF2) and is an important parameter representing the ionosphere. The data used in this study were obtained for Horseshoe Island at 67°49' 54.3747" S latitude, 67°14' 17.0298" W longitude. Data of TEC and critical frequency of the F2-region (foF2) from the TUR 1 GNSS receiver and the Global Ionosphere Radio Observatory (GIRO). The change in ionospheric plate thickness was calculated using. However, it was compared using the NeQuick2 model. In the study, it was determined that on selected days in December 2021, the solar cycle was at its minimum, the Kp index used to characterize the magnitude of geomagnetic storms was 4, and the Dst index was less than -30 nT. However, the monthly average F10.7 cm observed flux for December 2021 was calculated as 102.94 sfu. However, on December 27, 2021, the AE index was found to be greater than 500 nT. It has been observed that this situation is effective in the change in ionospheric plate thickness. Our preliminary findings will provide a basis for future predictions of climate change and space weather at Horseshoe Island.

Keywords: Antarctic, Total Electron Content, Ionosphere, Plate Thickness, Solar Activity

Sorumlu Yazar: Furkan Ali Küçük

Geliş Tarihi: 17 Nisan 2024

Kabul Tarihi: 28 Haziran 2024

Yayın Tarihi: 3 Temmuz 2024

Atıf Şekli: Küçük, F.A., Ökten, M.B., Arslan, E., Selbesoğlu, M.O., Yavaşoğlu, H.H., Özsoy, B. (2024). GNSS Verileri ve NEQUICK2 Modeli Kullanılarak Horseshoe Adası (Antarktika) İyonosferik Levha Kalınlığı Tahmini, *Atmosfer ve İklim Dergisi*, 1(1), 49-58.

Makale Tipi: Araştırma Makalesi

e-ISSN: 3023-8560

GİRİŞ

Toplam elektron içeriği (TEC: Total Electron Content)'nin F-tabakası tepe elektron yoğunluğuna (NmF2) oranı iyonosfer levha kalınlığı (τ) olarak ifade edilir. Bu kavram, iyonosferin hem üst hem de alt bölümü hakkında bilgi veren bir elektron yoğunluğu profili faktörüdür. TEC ve NmF2 oranı, iyonosferin yapısını ve davranışını anlamada önemli bir kavramdır. Bu oran, genellikle elektron yoğunluğunun dağılımını ve iyonosferin genel özelliklerini değerlendirirken kullanılır. TEC parametresinin birimi TECU'dur. 1 TECU, 10^{16} elektron/m² 'ye eşittir (Huang vd., 2016).

Levha kalınlığı ne kadar düşüğe, profil o kadar keskin ve tepe elektron yoğunluğu da o kadar belirgin olur. Ayrıca τ , yalnızca iyonosferdeki elektron yoğunluğunu değil, aynı zamanda yüksüz parçacıkların sıcaklığı hakkında da bilgi içerir. Bu, iyonosferin fiziksel özelliklerini anlamada önemli bir faktördür. Bu bilgi, varsayılan bir elektron yoğunluğu profili kullanılarak elde edilebilir ve iyonlaşabilir parametrelerin ölçek yüksekliği ile ilişkilendirilebilir. τ , NmF2 ile doğrudan ilişkilidir. Bu ilişki, TEC ve radyo dalgasının elektrik alanının kırılması hakkında tahminler yapmayı sağlar. Bu nedenle, levha kalınlığı, uydudan yere ulaşan radyo dalgası iletişimde oldukça yararlı bir parametre olarak kabul edilir (Pignalberi vd., 2022). İyonosferik levha kalınlığının herhangi bir konumda incelenmesi, iyonizasyon dağılımının doğası hakkında bilgi sağlar (Titheridge vd., 1973).

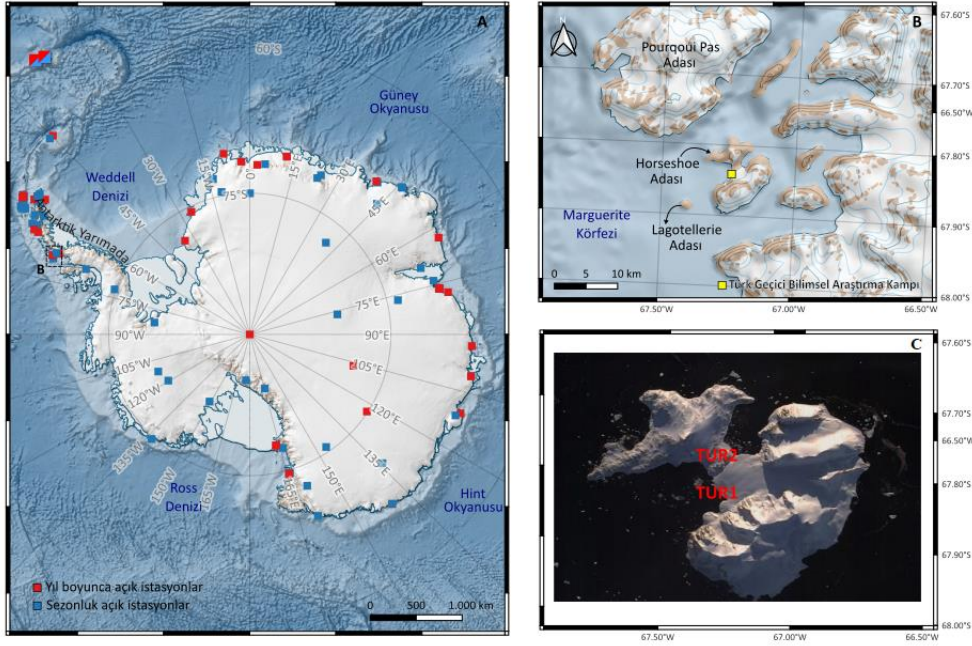
İyonosferin en tanımlayıcı parametresi elektron yoğunluğu içeriğidir. Zamana ve konuma bağlı değişiklik gösterir. Gelen Güneş radyasyonu, iyonosferdeki atom ve moleküllerin iyonlaşarak pozitif yüklü iyonları ve serbest elektronlar oluşturmasına sebep olur. Gün doğumuyla birlikte artan elektron yoğunluğunu, günbatımı ile iyon ve elektronların tekrar birleşmesi nedeniyle azalmaktadır. Gelen güneş radyasyonu ve güneş aktiviteleri iyonosferdeki electron yoğunluğunu değişimi üzerinde etkili bir rol oynamaktadır (Canyılmaz vd., 2016).

Güneş parlamalarının iyonosferdeki etkilerini izlemek ve analiz etmek için Küresel Konumlandırma Uydu Sistemleri (GNSS: Global Navigation Satellite Systems) verileri kullanmak idealdir. GNSS teknolojisinin kullanıldığı çalışmalarda serbest elektron miktarı TEC parametresi ile temsil edilir. Elde edilen TEC verileri, IGS İyonosfer Ortak Analiz Merkezleri (IGS-IAACs: International GNSS Service-Ionosphere Associate Analysis Centers) bünyesinde birçok farklı dünya genelinde farklı ülkelerdeki araştırma kuruluşları tarafından üretilen küresel iyonosfer haritalarına katkı sağlar ve önemli sayıda kullanıcıya günlük iyonosfer bilgisi sunar (Jin vd., 2007).

Ancak Antarktika gibi lojistik olarak ulaşılması zor bir bölgede sürekli küresel iyonosfer haritalarının oluşturulmasına katkı sağlamak ve günlük iyonosfer bilgisini vermek oldukça zordur. Bu nedenle birçok kurum ve kuruluştaki araştırmacılar GNSS ve GPS istasyonları kullanarak bölgesel iyonosfer haritaları oluşturarak katkı sağlamaktadır (Şentürk, 2021). Farklı sınıftan Güneş parlamaları kutup iyonosferini çeşitli şekillerde etkiler ve düzensizliklere yol açar (Selbesoğlu vd., 2021). Antarktika üzerindeki manyetik aktivite, güneş parlamaları ve diğer güneş aktivitelerine ilişkili GPS/GNSS faz sintilasyonu ile ilgili yapılmış çok sayıda çalışma (Kinrade vd., 2012; Guo vd., 2017; Pan vd. 2014) olmasına rağmen bu çalışmayla birlikte Horseshoe Adasında iyonosferik levha kalınlığının güneş aktivitesinden nasıl etkilendiği incelenip literature katkı sağlanması amaçlanmıştır. Bu ve benzer çalışmalar, Türkiye'nin Antarktika Antlaşması Sistemi'nde (ATS) etkin bir rol oynamasına olanak tanıyacaktır. Ayrıca, Türkiye'deki bilim insanları ve mühendislerin ileri teknoloji kullanımı ve geliştirilmesi konularında deneyim kazanmalarını sağlayacaktır. Antarktika gibi ekstrem bölgelerde elde edilen veriler, küresel iklim modellerine katkı sağlayarak iklim değişikliği ve uzay havası tahminleri konularında daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilmesine yardımcı olacaktır. Aynı zamanda, Türkiye'nin Antarktika'daki bilimsel varlığını güçlendirecek ve bölgedeki jeopolitik stratejilerde etkin bir rol oynamasına katkıda bulunacaktır. Sonuç olarak, bu tür çalışmalar, ülkemizin bilimsel ilerlemesi ve küresel bilimsel işbirliğindeki rolünü pekiştirecektir.

GÖZLEMLER VE YÖNTEMLER

Bu çalışmada kullanılan veriler, Batı Antarktika'da yer alan Türk Bilimsel Araştırma Kampı'nın bulunduğu Horseshoe Adası'nda konuşlandırılan GNSS (Global Navigation Satellite System - Küresel Uydu Seyrüsefer Sistemi) istasyonundan elde edilmiştir. Şekil 1'de istasyonun konumu gösterilmiştir. Bu sistem, Ulusal Antarktika Bilim Seferi'ne (Turkish Antarctic Expedition - TAE) katılan araştırmacılar tarafından Şubat 2020'de kurulmuştur. Antarktika kıtasında, TAE seferlerinin gerçekleştirildiği ve ilerleyen yıllarda Türkiye'nin Antarktika'daki bilim üssüne ev sahipliği yapması planlanan Horseshoe Adası, yaklaşık olarak $67,83^\circ$ G enlemi ve $67,24^\circ$ B boylamında yer almaktadır (Küçük, 2022).



Şekil 1. Antarktika Haritası (A), Horseshoe Adası (B) ve Horseshoe Adası'ndaki ilk GNSS alıcıları işaretleri konumları (TUR-1 ve TUR-2) (C)

GNSS ağı, dünya genelinde konum belirleme, navigasyon ve zamanlama hizmetleri sağlayan uydu tabanlı bir sistemdir. GNSS, çeşitli ülkeler tarafından geliştirilen ve işletilen birden fazla uydu sistemi içerir. GPS, GLONASS, GALILEO ve BEIDOU uydularından sinyal verilerini kaydedebilmektedir. GPS uyduları dünya çevresindeki altı yörünge düzlemine yayılmış yaklaşık 20.200 km yükseklikte bulunan 24'ten fazla uydudan oluşmaktadır. Her uydu, biri $f_1 = 1575,42$ MHz, diğeri $f_2 = 1227,60$ MHz olmak üzere iki frekansta sinyal gönderir. Horseshoe Adası'nda hali hazırda yer alan iki GNSS alıcısı TUR 1 ve TUR 2 olarak adlandırılmıştır. Bu iki istasyon alıcısı da 1'er dakikalık örnekleme hızında sinyalleri izlemek üzere ayarlanmıştır (Selbesoğlu vd., 2021). Çalışmada kullanılan veriler, $67^\circ 49' 54,3747''$ Güney enlemi ve $67^\circ 14' 17,0298''$ Batı boylamında yer alan TUR 1 isimli GNSS alıcısından elde edilmiştir. Bu veriler, G02 numaralı GPS uydusundan alınmıştır. İyonosfer dağınıklı bir ortam olduğundan, bilim insanları, çift frekans alıcılar tarafından kaydedilen taşıyıcı fazlar ve faz kodları üzerindeki modülasyon ölçümleriyle iyonosferik etkileri değerlendirebilirler. Özellikle GNSS alıcılarından elde edilen veriler sayesinde TEC, güneş kaynaklı farklı bölgelerde meydana gelen Güneş parlamalarının iyonosfer üzerine etkisi incelenebilir (Priyadarshi vd., 2021). Geliştirilen çeşitli modeller yardımıyla bölgesel iyonosferik haritalar oluşturulmaktadır. Geliştirilen mevcut modellerin çoğu alçak ve orta enlemleri hedef almaktadır. Orta ve alçak enlemlerin aksine; iyonosferin güneş aktivitesi seviyesinden doğrudan etkilendiği kutup bölgelerinin iyonosferi, elektron yağışları ve elektron yoğunluklarındaki düzensizlikler tarafından yönlendirilir (Liu vd., 2006). Dünya iyonosferinin doğru modellenebilmesi için küresel çapta veriye ihtiyaç vardır. Ancak bu durumu sağlayabilmek maliyetli ve uzun süreli olacaktır. Yeni teknolojilerin

gelişmesiyle birlikte, dünya çapında 80'den fazla konumda kurulu olan digisonde istasyonlarının katkısı ile Global İyonosferik Radyo Gözlem Evi (GIRO) portalı oluşturulmuştur: <http://giro.uml.edu>. Günümüzde, GIRO, 64 konumda toplamda 30 milyondan fazla iyonosferik ölçüm kaydına, 42 gerçek zamanlı RINEX veri akışına açık erişim sağlanmaktadır.

TEC, iki frekans arasındaki zaman gecikmesiyle ölçülür. Şu anda tüm GNSS istasyonları (GPS, GLONASS ve diğerleri) iki veya daha fazla frekansta çalışmaktadır. Uzay fiziği, jeodezi bilimi, arazi ölçümü ve yüksek hassasiyetli tarım gibi bazı kullanımlar yüksek hassasiyetli ölçümler gerektirir. Dünya genelinde bulunan bu çift frekanslı alıcıların verileri, günlük GNSS TEC haritalarını hesaplamak için kullanılır (Reinisch ve Galkin, 2011). GNSS verileri RINEX adı verilen bir formatta kaydedilir. Kaydedilen veriler, "gnss-tec" kütüphanesinin yardımıyla dönüştürülmüştür. "gnss-tec", küresel navigasyon uydu sistemleri (GPS, GLONASS vb.) tarafından sağlanan verileri kullanarak iyonosferde toplam elektron içeriğini yeniden oluşturmak için kullanılan bir Python paketidir. Kütüphane modülü, RINEX gözlem dosyalarından taşıyıcı fazı ve yarı-yol ölçümlerini girdi olarak kullanır (Web 1). GNSS verileri UT zaman diliminde kaydedilir. foF2 verileri ise, Küresel İyonosfer Radyo Gözlemevi (Global Ionospheric Radio Observatory – GIRO) portalından alınmıştır. GIRO portalı kullanılarak 67° 49' 54,3747" Güney enlemi, 67° 14' 17,0298" Batı boylamı için foF2 verileri saatlik olarak türetilmiştir.

Tepe elektron yoğunluğu (NmF2), aşağıdaki Eşitlik 1 ve 2'de gösterilen ilişki kullanılarak hesaplanmıştır.

$$NmF2 = 1,24(foF2)^2 \times 10^{10} \text{ el} \cdot \text{m}^{-3} \quad (1)$$

foF2 MHz olmak üzere,

İyonosferik eşdeğer levha kalınlığı (τ): vTEC'in Nm F2'ye oranı olarak tanımlanır:

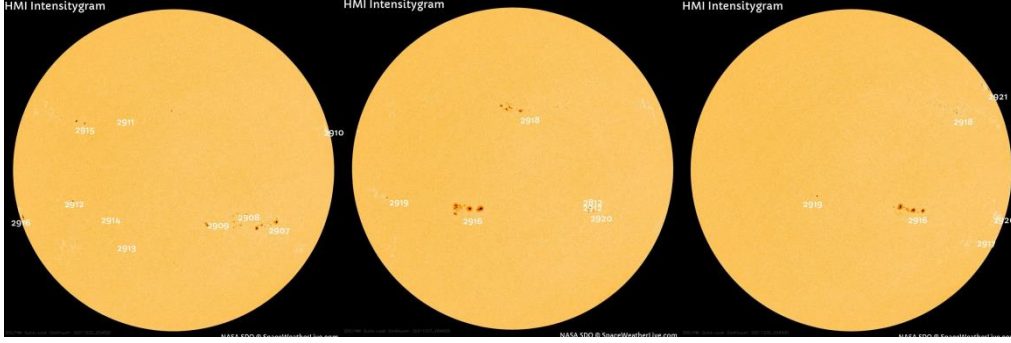
$$\tau = \frac{vTEC}{NmF2} \quad (2)$$

Burada NmF2, F bölgesinin el m^{-3} cinsinden maksimum elektron yoğunluğudur. Sonuç olarak τ , metre (m) cinsinden ifade edilir. Tüm dikey elektron yoğunluğu profiline eşdeğer bir vTEC değeri ile NmF2'ye eşit sabit elektron yoğunluğuna sahip ideal bir iyonosferik levhanın kalınlığını temsil eder. GIRO portalından elde edilen verilerin saatlik olarak alınabilmesi nedeniyle levha kalınlığının hesaplanabilmesi için TEC verilerinin saatlik ortalaması alınmıştır. Levha kalınlığı, yerel saatin bir fonksiyonu olarak her gün için ayrı ayrı 1 saatlik aralıklarla belirlenmiştir. Bu yöntem, iyonosferik levha kalınlığının günlük ve saatlik değişimlerini daha ayrıntılı bir şekilde analiz etmeyi mümkün kılar.

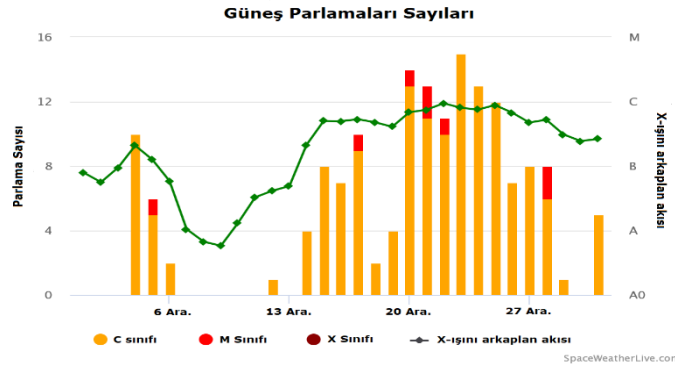
İyonosferik koşulların tahmin edilmesinde yaygın olarak kullanılan iki ampirik ve iklimsel model bulunmaktadır: Uluslararası Referans İyonosfer (IRI) ve NeQuick. Bu modeller, fiziksel modellere göre belki daha az hassas olmalarına rağmen iyonosferik koşulların neredeyse anlık tahmin edilmesi gereken durumlarda sıklıkla tercih edilmektedir (Osanyin vd., 2023). NeQuick modelinde veri alımının ana prensibi, yerel güneş radyo akısı veya iyonizasyon seviyesini belirleyerek model ile gözlemlenen TEC değerleri arasındaki farkı minimize etmektir (Nava vd., 2006). NeQuick2 modeli için doğrulama amaçlı olarak TEC verileri kullanılmıştır. NeQuick2, Abdus Salam Uluslararası Teorik Fizik Merkezi (ICTP) Astronomi ve Radyo Yayılım Laboratuvarı'nda geliştirilen iyonosfer elektron yoğunluğu modelinin en son sürümüdür. NeQuick2, yükseklik, jeosantrik enlem, jeosantrik boylam gibi koordinatlarla iyonosferdeki konumlar için elektron yoğunluğunu bir küre üzerindeki koordinatlara verir. Bu model paketi ile birlikte herhangi bir konumdan uyduya düz bir çizgi üzerinde noktasal elektron yoğunluğu hesaplanabilir (Usoskin, 2017).

Şekil 2, sırasıyla 22, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihlerindeki güneş lekelerinin konumunu ve büyüklüğünü göstermektedir. Aynı zamanda, Güneş'in kendi eksenini etrafında her gün belirli bir miktar döndüğünü ve bu

nedenle bazı güneş lekelerinin Güneş'in arka tarafına geçtiğini ifade etmektedir. Şekil 3, GOES uyduları tarafından Aralık 2021'de gözlemlenen güneş parlaması olaylarını göstermektedir. Şekil 3'ten görüleceği gibi aralık ayı içerisinde çoklu C sınıfı parlaması meydana geldiği açıkça görülüyor. Bununla birlikte sadece 6 günde M sınıfı parlaması görülmüştür. Ayrıca, aralık ayı içerisinde X sınıfı parlaması görülmemiştir.

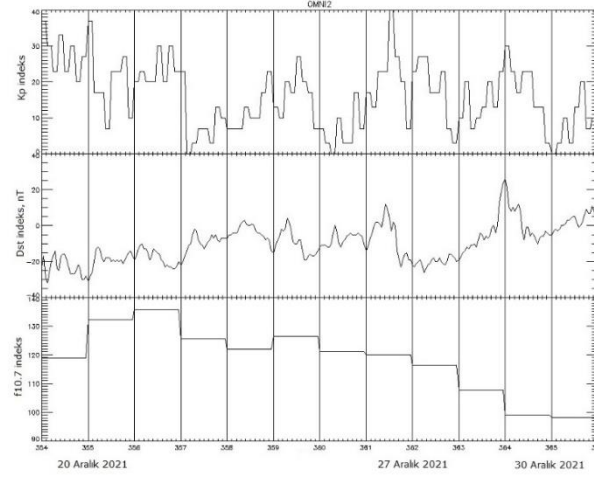


Şekil 2. Sırasıyla 22, 27 ve 30 Aralık 2021 için Güneş lekeleri bölgelerini içeren Güneş haritaları (Web-2)



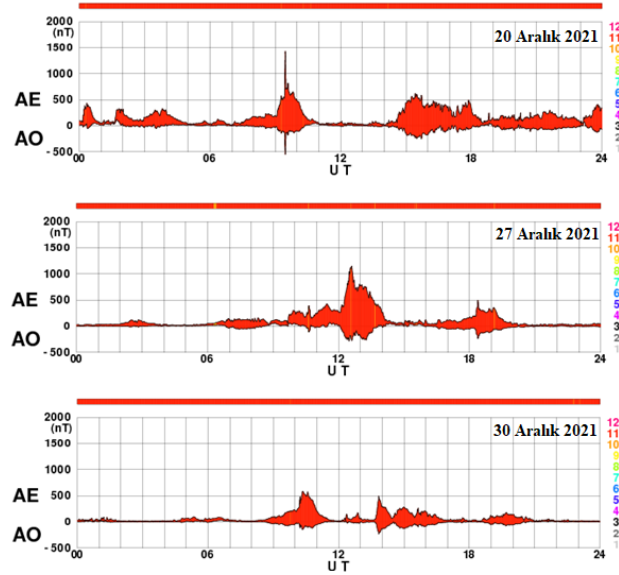
Şekil 3. Aralık ayı için güneş parlamaları sayısı (Web-2)

Güneş aktivitesinin iyonosferin dinamikleri üzerindeki doğrudan etkisi, literatürde iyi bilinmektedir (Nava vd., 2006). Güneş, dünya iyonosferindeki molekülleri iyonize eden başlıca enerji kaynağıdır. Güneş radyasyonu farklı yüksekliklerde eşit olmayan bir şekilde dağılır ve bu durum elektron yoğunluğunda dalgalanmalara neden olur. Ayrıca, Dünya'nın kendi eksenini etrafında dönmesi, günlük elektron yoğunluğu değişimlerinde önemli bir rol oynar. Bu durum, güneş radyasyonunun TEC değişimleriyle güçlü bir ilişkisini gösterir. TEC dalgalanmalarını etkileyen birçok faktör bulunmaktadır; bunlar arasında güneş parlamaları, güneş radyasyonu miktarı ve fotoiyonizasyona bağlı değişkenlik, güneş rüzgarı-manyetosfer-iyonosfer etkileşimi ve bu etkileşimin bileşenleri önemlidir (Web 2). İyonosferik TEC değişimlerinin ve ampirik modellerin incelenmesinde jeomanyetik parametre olarak genellikle Kp ve Dst indeksleri kullanılmaktadır. F10.7 cm akısı, güneş lekeleri sayısı, Kp ve Dst, AE indeksleri OMNIWEB'den (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>) tedarik edilebilir. F10.7 ve SSN'nin zamansal çözünürlüğü günlük iken, jeomanyetik Kp ve Dst indeksinin zamansal çözünürlükleri sırasıyla 3 saat ve 1 saattir.



Şekil 4. 20 – 31 Aralık 2021 tarihleri boyunca F10.7 cm akısı, Kp ve Dst indeksleri grafiği gösterilmektedir.

Şekil 4’te 20, 27 ve 30 Aralık tarihlerinde Dst_{min} sırasıyla > -20 nT, > -30 nT ve > 0 nT iken, Kp indeks değeri 4, 1 ve 1 olarak görülmektedir. Ancak 27 Aralıktan hemen önce Kp indeks değerinin tekrar 4’e kadar çıktığı görülmektedir. 2021 yılı aralık ayında aylık ortalama F10.7 cm gözlemlenen akı 102.94 sfu ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ Wm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$) olarak hesaplanmıştır. 21 Aralık 2021 tarihi için ölçülen F10,7 cm akısı 115 sfu, 27 Aralık 2021 tarihi için 125 sfu ve 30 Aralık 2021 için ise 111 sfu olarak ölçülmüştür.



Şekil 5. 20, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihleri için AE indeksleri grafiği gösterilmektedir.

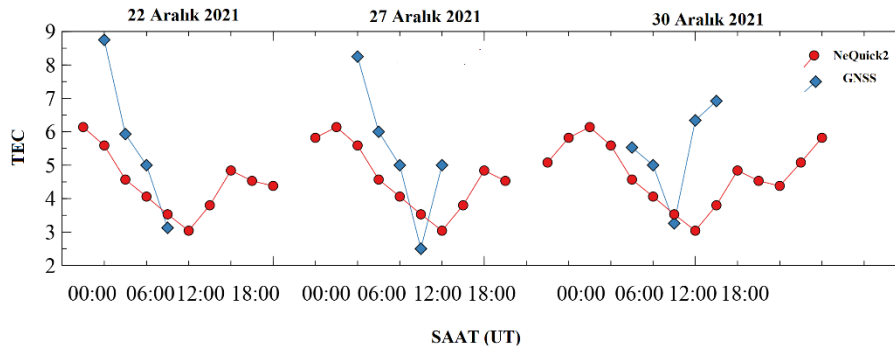
Şekil 5’te 20, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihlerinde manyetik aktivitelerin olduğunu ve dolayısıyla manyetik aktivite ile ilişkili dinamiklerin hali hazırda işlemekte olduğu gösterilmektedir. 20 Aralık 2021 tarihinde AE indeksi, 10:30 UT’de yaklaşık 1500 nT değerine ulaşmış ve daha sonra 15:00 UT’de 500 nT ve üzerinde kalmıştır. 27 Aralık 2021 tarihinde 12:30 UT zaman diliminde 1000 nT ve üzerinde olduğu görülürken, aynı gün içerisinde 500 nT’ye yaklaşmıştır. 30 Aralık 2021 tarihinde ise 10:30 UT ve 14:00 UT zaman diliminde 500 nT ve üzerinde kalmıştır. Şekil 4 ve şekil 5’e bakıldığında 20 Aralık 2021 tarihinde Kp indisi 4’e kadar çıkmasına rağmen, yukarı enlemler için daha iyi bir manyetik aktivite göstergesi olan AE indisi çalışmanın yapıldığı günlerde

mikrofırtınalar olduğunu göstermektedir. Bu değerler, manyetik aktivitenin yoğun olduğunu ve jeomanyetik fırtınaların etkilerinin gözlemlendiğini işaret etmektedir.

MODEL VE GÖZLEM KARŞILAŞTIRMASI

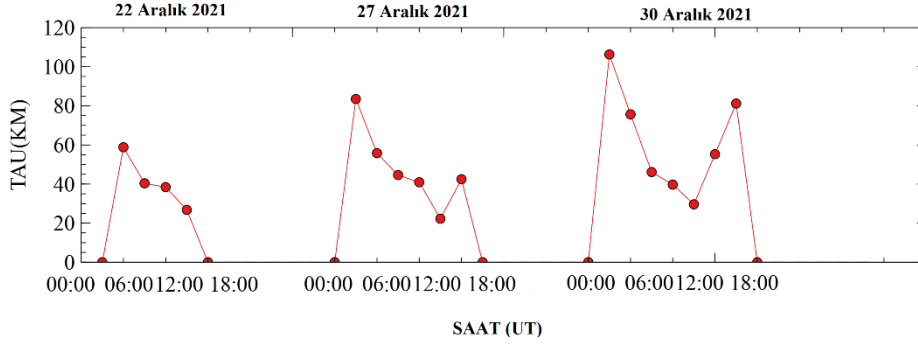
Çalışmamızda, Antarktika Horseshoe Adası'nda yer alan Türk Bilimsel Araştırma Kampı'nda bulunan TUR 1 isimli GNSS alıcısından elde ettiğimiz TEC ölçümleri ile GIRO portalından elde edilen iyonosferik elektron yoğunluğu profillerini kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, güneş çevrimin ve güneş aktivitesinin minimum seviyede olduğu günlerde iyonosferik TEC değişimini nasıl etkilediğini göstermek amacıyla analiz edilmiştir. Ayrıca, iyonosferik levha kalınlığı, NeQuick2 modeli çıktısı ile karşılaştırılmıştır. Bu çalışma, güneş aktivitesinin iyonosferik özellikler üzerindeki etkisinin anlaşılmasına ve bu etkilerin ölçüm ve modelleme araçlarıyla nasıl analiz edilebileceğine dair bir temel sağlamaktadır.

TEC verileri G02 GPS uydusundan elde edilebilirken, aşırı hava koşulları ve teknik aksaklıklar nedeniyle sınırlı ve eksik veri seti bulunmaktadır. Bu nedenle, bu makaledeki tüm tartışmalarımızda, güneş çevriminin minimum olduğu 2021 yılı aralık ayı seçilmiştir. Seçilen dönem içerisinde veri setinin eksiksiz olduğu gün sayısının kısıtlı olmasından dolayı 20, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihlerini içeren üç günlük bir veri seti seçilerek farklı bir bakış açısı sunulmak istenmiştir.



Şekil 6. 22, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihleri için G02 GPS Uydusu verisi ve NeQuick2 modeli kullanılarak oluşturulan TEC grafiği gösterilmektedir.

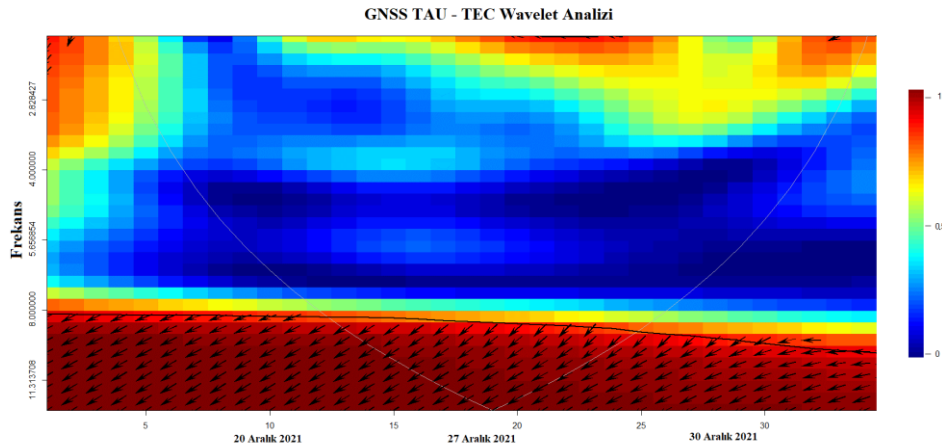
Şekil 6, 22, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihinde GNSS verileriyle günlük TEC davranışını ve NeQuick2 model çıktılarını göstermektedir. Şekilden, Güneş'in doğuş ve batışına göre günlük TEC maksimum ve minimum değerler gözlemlenmesi olağandır. Aralık ayı, Antarktika'da yaz mevsiminin başlangıcıdır ve günler uzamaya başlar. Ancak ana yaz mevsimi olan Ocak-Şubat'ın aksine, aralık ayında akşam süresi çok uzun değildir. Güneşin ufkun altına inip alacakaranlık tanısı oluşturmamasından kaynaklı olarak gelen güneş radyasyonunun neredeyse 24 saat mevcut olduğu gösterilmektedir. Ancak iyonosferik değişiklikleri gözlemlemek için aylık ve dönemsel eksiksiz veri setine ihtiyaç duyulmaktadır. GNSS alıcısından elde edilen TEC değerleri ile 00:00 UT'den 12:00'ye kadar azalma görülmektedir. Veri setindeki eksiklikten dolayı 12:00 UT ve sonrası için TEC değeri bulunmamaktadır. NeQuick2 model çıktısı olarak elde edilen TEC değerleri 00:00 UT'den 12:00'ye kadar azalır ve sonrasında artış göstermektedir. Bu durum, gelen güneş radyasyonunun azaldığını ifade etmektedir. 12:00 UT'lerde o gün içindeki minimum değerde olduğu görülmektedir. 20 ve 27 Aralık 2021 tarihli veri setlerinde veri eksikliğinden dolayı net bir şekilde görülmesine de 30 Aralık günü 18:00 UT'den itibaren tekrar artan bir TEC değeri gözlenmektedir. 22 Aralık 2021 tarihinde, iyonosferik günlük maksimum TEC değeri 02:00 ile 04:00 UT arasında gerçekleşirken, minimum TEC değeri 08:00 UT'den sonra gerçekleşmektedir. 27 Aralık 2021 tarihinde GNSS verileri, günlük TEC davranışının 06:00 ile 08:00 UT arasında olduğunu gösterirken, iyonosferik günlük maksimum TEC değeri 02:00 ile 04:00 UT arasındadır. Son olarak, 30 Aralık 2021 tarihinde, iyonosferik günlük maksimum ve minimum değerleri veri eksikliğinden dolayı net olarak söylenememektedir.



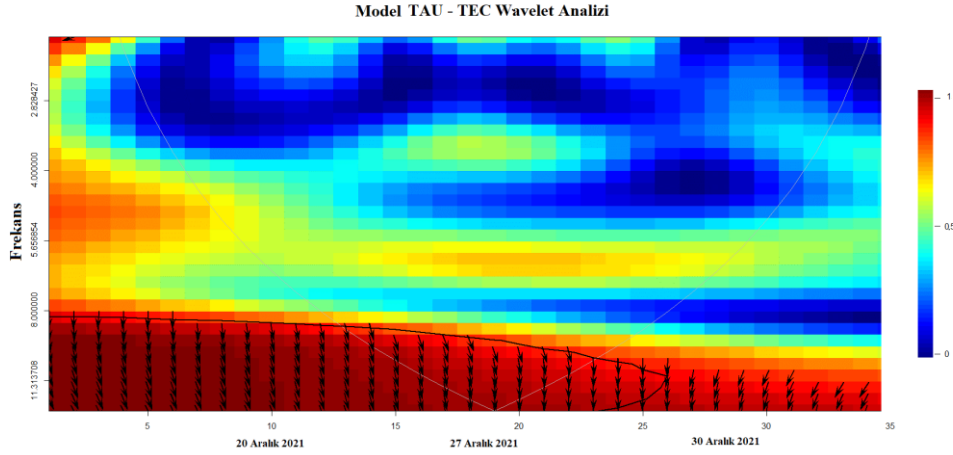
Şekil 7. 22, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihleri için τ değişimi gösterilmektedir.

Şekil 7'de gösterilen GNSS verileri kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılan NeQuick2 modeli çıktısına bakıldığında günlük TEC maksimum ve minimum değerleri görülmektedir. Şekil 7'da 22, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihleri için τ değişimi gösterilmektedir. Şekil 7'ye bakıldığında hesaplanan τ değişimi 00:00 UT'den 06:00 UT'ye kadar artış göstermektedir. 06:00 ile 08:00 UT arası minimum azalma görülürken, 12:00 UT itibariyle hızlı bir düşüş görülmektedir. Gelen güneş radyasyonunun azalmasıyla birlikte beklenen bir durumdur.

Şekil 8 ve 9'da sırasıyla TEC ve TAU arasındaki küçük, orta ve büyük ölçeklerdeki ilişkilerin anlaşılması için dalgacık analizi sonuçları gösterilmektedir. Şekil 8'de GNSS verileriyle elde edilen TEC ve TAU dalgacık analizi grafiği gösterilirken, şekil 9'da NeQuick2 Model çıktılarında elde edilen TEC ve TAU dalgacık analizi grafiği gösterilmektedir. Dalgacık dönüşümü, farklı frekanslardaki durağan olmayan sinyal güçlerini analiz etmek için kullanılan modern bir matematiksel yöntemdir (Dabbakuti ve Ratnam, 2016). Her iki şekilde de zaman yatay ekseninde gösterilirken, dikey eksen frekansı ifade etmektedir (düşük frekans, büyük ölçek olarak ifade edilir). Zaman-frekans uzayında iki zaman serisinin birlikte değiştiği bölgeler dalgacık tutarlılığı ile bulunur. Sıcak renkler (kırmızı) olarak ifade edilen bölgeler, önemli karşılıklı ilişkiye sahip bölgeleri temsil etmektedir. Gözlem verileriyle elde edilen TAU ile model çıktısı olarak verilen TAU'ların karşılıklı analiz edilmesi ve ortak değişkenlik ile tutarlılığın gösterilmesi için Şekil 8 ve 9'a birlikte bakılmalıdır. Sonuç olarak, küçük ölçek olarak gösterilen 8 ile 11 frekanslarında üç gün de ortak değişkenliği ve tutarlılığı göstermektedir. 8 ile 4 frekanslarında ise GNSS ve Model çıktısı olan TAU'lar arasında pozitif bir uyum görülmemektedir. Bu durum, zaman-frekans uzayında iki zaman serisinin de birlikte uyumlu hareket ettiğini ifade eder.



Şekil 8. Gözlemlerden elde edilen TEC ve TAU dalgacık analizi



Şekil 9. NeQuick2 Model çıktılarından elde edilen TEC ve TAU dalgacık analizi

SONUÇLAR

Bu çalışmada 2021 yılı aralık ayının Horseshoe Adası (Antarktik Yarımada) üzerindeki belirli bir konumdan kısa süreli TEC kullanılarak, NeQuick2 modeli kullanılarak oluşturulan TEC tahminleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu çalışmanın ana sonuçları şu şekilde özetlenebilir: Elektron yoğunluğu, iyonosferik levha kalınlığı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Jeomanyetik fırtınanın olmadığı, Kp ve Dst indekslerinin normal değerde olduğu, F10,7 cm akısının yüksek olmadığı ancak AE indeks değerinin 500 nT ve üzerinde olduğu günlerde, iyonosferik levha kalınlığının değişimi görülmektedir. GNSS ve NeQuick2 modeli çıktısına bakıldığında günlük TEC minimum değerleri büyük oranda örtüşmektedir. Dalgacık analizi sonuçlarına bakıldığında, sırasıyla 20, 27 ve 30 Aralık 2021 tarihlerinde GNSS ve NeQuick2 modeli küçük ölçekte benzer güç spektrumunu göstermektedir. Bu çalışmanın sonucu, kutup bölgeleri üzerinde iyonosferik uzaktan algılama gözlemleri kullanılarak iyonosferik tahmin modelinin geliştirilmesi için iyonosferik TEC değişkenliğinin temel girdilerinin sağlanmasında faydalı olacaktır. Ek olarak, 2021'deki tüm güneş etkinliklerini kapsayan bir yıllık bir çalışma yapılması gerektiğini ve standart sapma ve dalgacık (wavelet) analizi yöntemlerini uygulayarak bu eğilimler arasındaki ilişkinin daha ayrıntılı incelenmesi önerilir.

TEŞEKKÜR

Projede kullanılan GNSS verileri, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 118Y322 numaralı projeden alınmıştır.

KAYNAKLAR

- Canyılmaz, M., Akdoğan, T., ve Güzel, E. (2016). Ölçülen ve IRI Modeli ile Elde Edilen İyonküre Kritik Frekansının (foF2) Karşılaştırılması. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(1).
- Dabbakuti, J. K., ve Ratnam, D. V. (2016). Characterization of ionospheric variability in TEC using EOF and wavelets over low-latitude GNSS stations, *Advances in Space Research*, 57(12), 2427-2443.
- Huang, H., Liu, L., Chen, Y., Le, H., Wan, W. (2016), A global picture of ionospheric slab thickness derived from GIM TEC and COSMIC radio occultation observations, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 121, 867– 880, doi:10.1002/2015JA021964.
- Jin, S., Cho, J. H., ve Park, J. U. (2007). Ionospheric slab thickness and its seasonal variations observed by GPS. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 69(15), 1864-1870.
- Kucuk, F. A., vd., (2022). Estimating Ionospheric Slab Thickness for the One Month Period of December 2021 in Horseshoe Island, western Antarctica (Özet), *ATMOS 22, İTÜ*, İstanbul. Erişim adresi: <https://www.atmosfer.itu.edu.tr/atmos2022/abstracts/>.
- Liu, J. Y., Lin, C. H., Chen, Y. I., Lin, Y. C., Fang, T. W., Chen, C. H., Chen, Y. C., and Hwang, J. J. (2006). Solar flare signatures of the ionospheric GPS total electron content, *J. Geophys. Res.*, 111, A05308, doi:10.1029/2005JA011306.
- Nava, B., Radicella, S. M. ve Azpilicueta, F. (2011). Data ingestion into NeQuick 2. *Radio Science*, 46(06), 1-8.
- Nava, B., Radicella, S. M., Leitinger, R., ve Coïsson, P. (2006). A near-real-time model-assisted ionosphere electron density retrieval method, *Radio Science*, 41(06), 1-8.

- Osanyin, T. O., Candido, C. M. N., Becker-Guedes, F., Migoya-Orue, Y., Habarulema, J. B., Obafaye, A. A., ... ve Moraes-Santos, S. P. (2023). Performance of a locally adapted NeQuick-2 model during high solar activity over the Brazilian equatorial and low-latitude region, *Advances in Space Research*, 72(12), 5520-5538.
- Pignalberi, A., Pietrella, M., Pezzopane, M. et al. (2022). The Ionospheric Equivalent Slab Thickness: A Review Supported by a Global Climatological Study Over Two Solar Cycles. *Space Sci Rev* 218, 37. <https://doi.org/10.1007/s11214-022-00909-z>
- Priyadarshi, S., Zhang, Q. H. ve Wang, Y. (2021). Geomagnetic storm-time scintillation study in Antarctica-A comparison of model and observation, *Polar Science*, 28, 100634.
- Reinisch, B.W., Galkin, I.A. (2011). Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO), *Earth Planet Sp*, 63, 377-381 <https://doi.org/10.5047/eps.2011.03.001>
- Selbesoğlu, M. O., Yavaşoğlu, H. H., Karabulut, M. F., Yavaşoğlu, H. A., Özcan, H. G., Oktar, Ö., Özsoy, B., Karaman, H., Kamaşak, M. E. ve Gülal, 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 Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21 (6), 1353-1365. DOI: 10.35414/akufemubid.946282
- Şentürk, E. (2021). Küresel İyonosfer Haritalarının Türkiye'deki Performansının GNSS Verileriyle İstatistiksel Olarak İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 23(67), 247-255. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2021236721>
- Titheridge, J. E. (1973). The slab thickness of the mid-latitude ionosphere, *Planetary and Space Science*, 21.10, 1775-1793.
- Usoskin, I.G. (2017). A history of solar activity over millennia, *Living Rev Sol Phys*, 14, 3 <https://doi.org/10.1007/s41116-017-0006-9>
- Web 1: Zhivetiev,I., <https://github.com/gnss-lab/gnss-tec>, 2019.
- Web 2: www.spaceweatherlive.com