



Küresel İyonosfer Haritalarının Türkiye'deki Performansının GNSS Verileriyle İstatistiksel Olarak İncelenmesi

Statistical Analysis of Performance of Global Ionosphere Maps with GNSS Data in Turkey

Erman Şentürk ^{1*} 

¹ Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, TÜRKİYE
Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: erman.senturk@kocaeli.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 28.03.2020

Kabul Tarihi / Accepted: 16.07.2020

Atıf şekli/ How to cite: ŞENTÜRK, E. (2021). Küresel İyonosfer Haritalarının Türkiye'deki Performansının GNSS Verileriyle İstatistiksel Olarak İncelenmesi. DEUFMD, 23(67), 247-255.

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2021236721

Öz

Uzay ve yer küre arasında seyahat eden sinyaller frekanslarına bağlı olarak atmosferin iyonosfer katmanındaki serbest elektronlardan etkilenir. Bu kapsamda iyonosferdeki serbest elektron miktarının doğru ve hassas olarak belirlenebilmesi birçok farklı disiplin açısından oldukça önemlidir. Günümüzde birçok farklı kurum/kuruluş çeşitli hesaplama tekniklerini kullanarak küresel ölçekte iyonosfer modelleri üretmektedir. Bu çalışmada, 6 farklı kurum/kuruluş tarafından üretilen 11 farklı Küresel İyonosfer Haritası (GIM: Global Ionosphere Map) verisi, Uluslararası GNSS Servisi (IGS: International GNSS Service)'ne ait ankr (39.89°N, 32.76°E) kodlu istasyondan elde edilen Toplam Elektron İçeriği (TEC: Total Electron Content) verileriyle karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma, yüksek güneş aktivitesinin olduğu 2013-2014 ve düşük güneş aktivitesinin olduğu 2017-2018 yıllarını kapsamaktadır. Sonuçlar, 2013-2014 yıllarında IGS ve 2017-2018 yıllarında Avrupa Yörünge Belirleme Merkezi (CODE: Center for Orbit Determination in Europe) tarafından üretilmekte olan GIM-TEC değerlerinin GNSS-TEC değerleriyle daha uyumlu olduğunu göstermiştir. Buna göre GIM-TEC ile GNSS-TEC farklarının en düşük yıllık kök ortalama karesel hata (RMSE: Root Mean Square Error) değerleri, 2013-2014 yıllarında IGSG 'de yaklaşık 1 TECU ve 2017-2018 yıllarında CODG 'de yaklaşık 0.6 TECU olarak tespit edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, güneş aktivitesi ve dünya üzerindeki farklı bölgelere göre GIM performanslarının incelenmesinin, özellikle iyonosferik TEC değerlerinin hassas olarak elde edilmesinin önemli olduğu çalışmalarda (konum belirleme, seyrüsefer, uzaktan algılama, haberleşme vb.) gerekli olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: GNSS, İyonosfer, Küresel iyonosfer haritası, Performans analizi

Abstract

Signals traveling between space and earth are effected from free electrons in the ionosphere layer of the atmosphere, depending on their frequencies. In this context, accurate and precise determination of the amount of free electrons in the ionosphere is very important for many different disciplines. Nowadays, many different institutions/organizations produce ionosphere models on a global scale using various calculation techniques. In this study, 11 different Global Ionospheric Map (GIM) data produced by 6 different institutions/organizations were compared with TEC data obtained from ankr station of International GNSS Service (IGS). The comparison covers 2013-2014 with high solar activity

and 2017-2018 with low solar activity. The results showed that the GIM-TEC values produced by IGS in 2013-2014 and CODE in 2017-2018 were more compatible with the GNSS-TEC values. Accordingly, the lowest annual RMSE values of the GIM-TEC and GNSS-TEC differences were found to be about 1 TECU of IGSG in 2013-2014 and about 0.6 TECU of CODG in 2017-2018. The results of the study shown that it is necessary to investigate the GIM performances according to the solar activity and different regions of the world, especially in studies where it is important to obtain the precise ionospheric TEC values (positioning, navigation, remote sensing, communication, etc.).

Keywords: GNSS, Ionosphere, Global ionosphere map, Performance analysis

1. Giriş

İyonosfer tabakası içerisinde barındırdığı iyonize olma potansiyelli atomlar nedeniyle temelde güneş aktivitesine bağlı olarak değişkenlik gösteren atmosfer tabakasıdır. Bu değişkenlik içerisinde barındırdığı serbest elektron miktarı ile ilişkilidir ve Küresel Konumlandırma Uydular Sistemi (GNSS: Global Navigation Satellite Systems) teknolojisinin kullanıldığı çalışmalarda serbest elektron miktarı TEC parametresi ile temsil edilir. TEC parametresinin birimi TECU'dur ve 1 TECU 10^{16} elektron/m²'ye eşittir. Bu değer sinyal yolu boyunca 1 m² taban alanına sahip bir silindirik içerisindeki toplam serbest elektron miktarını ifade eder. Sinyal yolu boyunca serbest elektron miktarı, Eğik Toplam Elektron İçeriği (STEC: Slant Total Electron Content) değerine karşılık gelir. STEC, dünya yüzeyinden yaklaşık 20.200 km yükseklikte bulunan GNSS uydularından alıcıya sinyal yolu geometrisine bağlıdır. STEC bir haritalama fonksiyonu yardımıyla yeryüzüne dik doğrultudaki serbest elektron miktarını belirten Düşey Toplam Elektron İçeriği (VTEC: Vertical Total Electron Content)'ne dönüştürülür [1]. Bu dönüşüm küresel ve bölgesel iyonosfer modellerinin giriş verisini oluşturan ve iyonosferdeki tüm iyonizasyonu tanımlamada daha etkili bir parametre olan VTEC değerlerinin elde edilmesi açısından önemlidir.

Atmosferde ilerleyen bir GNSS sinyali, sinyal frekansının karesinin tersi oranında iyonosferdeki serbest elektron miktarına bağlı olarak gecikme/hızlanma etkisine maruz kalır. Sinyaldeki gecikmenin frekans bağımlı olması sayesinde en az çift frekanslı bir GNSS alıcısı yardımıyla, frekanslarda meydana gelen iyonosferik etkinin farklılığı üzerine kurulu bir modelleme (kod ölçüleri, faz ölçüleri veya her ikisinin birleşimi) ile iyonosferdeki toplam serbest elektron miktarı hesaplanabilir. Ayrıca son yıllarda tek frekanslı alıcılarla TEC modelindeki bazı parametrelerin IGS'den elde

edildiği Hassas Konum Belirleme (PPP: Precise Point Positioning) tekniği yardımıyla TEC parametresi hesaplanabilmektedir [2,3].

İyonosfer tabakası, atmosferden geçen her türlü sinyali içerisinde barındırdığı serbest elektronlar nedeniyle etkilemesinden dolayı birçok farklı disiplin için önemli bir atmosfer tabakasıdır. Bu tabakadaki serbest elektron sayısının hassas bir şekilde belirlenmesi uzay temelli çalışmalarda iyonosfer kaynaklı oluşan hataların elimine edilmesi veya azaltılması açısından oldukça değerlidir. Bu kapsamda, IGS İyonosfer Ortak Analiz Merkezleri (IGS-IAACs: International GNSS Service-Ionosphere Associate Analysis Centers) bünyesinde birçok farklı kurum/kuruluş küresel ölçekte iyonosfer modelleri üretmektedir. IGS Mayıs 1998'de iyonosfer çalışma grubunu oluşturmuş ve 5 farklı araştırma merkezi GNSS verilerinden küresel ölçekte gridlenmiş iyonosfer haritaları ve GNSS uyduları ile IGS'e ait GNSS istasyonları için Diferansiyel Kod Sapmasını içeren çeşitli iyonosferik ürünleri üretmeye başlamıştır [4]. Ayrıca elde edilen veriler arasında uyumlu değişimler ve karşılaştırmalar yapmak için aynı yıl içerisinde İyonosfer Harita Değişim Formatı (IONEX: Ionosphere Map Exchange Format) oluşturulmuştur [5]. IGS-IAACs final, hızlı ve tahmin olmak üzere üç farklı formatta IONEX dosyası yayınlar. Hızlı IONEX dosyaları ilgili günün 24 saat sonrasında ve final IONEX dosyaları 1-2 hafta sonrasında yayınlanır. 2018 yılı itibarıyla tahmin IONEX dosyaları, üç farklı araştırma merkezi (Avrupa Yörünge Belirleme Merkezi - C1PG, C2PG; Avrupa Uzay Ajansı/Avrupa Uzay Operasyon Merkezi - E1PG, E2PG; Katalonya Teknik Üniversitesi - U2PG) tarafından 1 ve 2 günlük tahminleri içerecek şekilde yayınlanmaktadır. Bu tahmin verileri, gerçek zamanlı ve tek frekanslı alıcı kullanılan uygulamalarda iyonosfer kaynaklı hataları en aza indirmek için oldukça önemli bir veri kaynağıdır [6]. IONEX dosyaları <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/>

adresinde ücretsiz olarak yayınlanmaktadır. Herhangi IONEX dosyasını elde edebilmek için dizinin devamına YYYY/DDD/AAAgDDD#.YYi.Z şeklinde bir tanımlama yapmak gerekir. Burada YYYY IONEX dosyasının yılını, DDD yılın gününü, AAA analiz merkezinin kodunu, # ilgili gündeki dosya numarasını, YY ilgili yılın son 2 hanesini temsil etmektedir.

Küresel modeller, farklı yaklaşım ve hesaplama teknikleriyle gridlenmiş GIM-TEC verisi üretirler [7]. Bu veri ihtiyaca göre değişen enlem ve boylam farklarına göre gridlenmiş ve gün içi farklı zaman dilimlerini (15 dakika, 1 saat, 2 saat vb.) içerecek şekildedir. Analiz merkezlerinin kullandığı farklı yaklaşım ve hesaplama teknikleri nedeniyle iyonosfer haritaları arasında doğruluk açısından farklılıklar oluşmaktadır. IGS, tüm analiz merkezleri tarafından üretilen GIM 'lerin ortalaması olacak şekilde kombine edilmiş final IONEX (IGSG) dosyasını 1998 yılından beri yayınlamaktadır ve bu harita için doğruluk 2-8 TECU olarak belirlenmiştir. Tablo 1 'de çalışmada kullanılan GIM 'lerin kodu, üreten analiz merkezi ve üretim türü ile yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

Tablo 1. GIM 'lerin kodu, üreten analiz merkezleri, türü ve üretim aşamasında kullanılan hesaplama teknikleri

Kodu	Analiz Merkezi	Türü	Yöntem
CODG CORG	Avrupa Yörünge Belirleme Merkezi	Final Hızlı	Küresel Harmonikler
ESAG ESRG	Avrupa Uzak Ajansı/Avrupa Uzak Operasyon Merkezi	Final Hızlı	Küresel Harmonikler
IGSG IGRG	Uluslararası GNSS Servisi	Final Hızlı	Ağırlıklı Ortalama
JPLG JPRG	Jet İtme Laboratuvarı	Final Hızlı	Üç Kabuk Modeli
UPCG UPRG	Katalonya Teknik Üniversitesi	Final Hızlı	Spline ile Tomografik
WHUG	Wuhan Üniversitesi	Final	Küresel Harmonik ve değişken kısıtlı en küçük kareler

Çeşitli iyonosferik modellerin doğruluk analizleri dünyanın farklı bölgeleri ve farklı zaman dilimlerini içerecek şekilde daha önceki bazı bilimsel çalışmalarda ele alınmıştır. [8], GPS Broadcast, Uluslararası Referans İyonosfer (IRI: International Reference Ionosphere) ve 5 farklı IGS-IAACs tarafından üretilen GIM modellerinin 1998-2001 yılları arasında deniz ve okyanuslar üzerindeki performansını TOPEX uydusundan elde edilen VTEC değerleri ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Buna göre GIM 'lerin diğer modellere göre TOPEX verileriyle daha iyi uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Ortalama sapma hatası (bias) ve görece hata (RE: Relative Error) değerleri göz önüne alındığında Jet İtme Laboratuvarı (JPL: Jet Propulsion Laboratory) ve Katalonya Teknik Üniversitesi (UPC: Universitat Politècnica de Catalunya) tarafından üretilen GIM 'lerin diğer araştırma grupları tarafından üretilen GIM 'lere göre performansının ilgili yıllar arasında daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. [9], Çin'in düşük ve orta enlem bölgesinde orta seviyeli güneş aktivitesi altında küresel olarak ulaşılabilir 5 farklı iyonosferik modelin (GIM, IRI, Parametrelenmiş İyonosferik Model [PIM: Parameterized Ionospheric Model], Klobuchar ve NeQuick) performansını karşılaştırmalı olarak test etmişlerdir. Buna göre tüm modellerin orta enlem bölgesinde düşük enlem bölgesine görece daha iyi performans sergiledikleri görülmüştür. Ayrıca PIM 'in hem düşük hem de orta enlem bölgesinde diğer modellere göre daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. [10], 4 farklı IGS-IAACs tarafından üretilen GIM 'lerin Çin üzerindeki performansını, GNSS ve TOPEX 'den elde edilen VTEC değerleriyle karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Sonuçlar, düşük enlem bölgesinde güneş aktivitesinin yüksek olduğu dönemlerde UPC tarafından üretilen GIM 'lerin performansının diğerlerine görece çok daha başarılı olduğunu göstermiştir. Orta enlem bölgesinde düşük güneş aktivitesinin olduğu dönemlerde ise GIM 'ler arasında önemli bir farklılık görülmemiş, herhangi birinin kullanıcılar tarafından tercih edilebileceği vurgulanmıştır. [11], 7 farklı IGS-IAACs tarafından üretilen GIM 'lerin performanslarını, VTEC altimetre (TOPEX, JASON-1, JASON-2) ve GNSS-TEC değerleriyle, 2001 yılının 180. gününden 2016 yılının 7. gününe kadar karşılaştırmalı olarak analiz etmişlerdir. Buna göre UPC tarafından üretilen GIM (UQRG) modelinin diğerlerine görece karşılaştırma

verileriyle daha uyum içerisinde olduğu görülmüştür. [12], 2014 yılı için ZONG istasyonu verileriyle Türkiye iyonosferinin mevsimsel değişimini incelemiştir. Ayrıca GNSS gözlemlerinden elde edilen TEC değerlerini IRI-2012'den elde edilen TEC değerleriyle karşılaştırmışlardır. Sonuçlar IRI-2012'nin yeterli hassasiyette TEC değerleri üretmediğini göstermiştir. [13], 2015 yılı için ANKR istasyonu verileriyle Türkiye iyonosferinin mevsimsel değişimini Yapay Sinir Ağları (YSA) tekniği ile incelemiştir. Yöntemin başarısını RMSE ve korelasyon (R) istatistik göstergeleri ile test edilmiştir. Sonuçlar, YSA modelinin GPS-TEC'i ANKR istasyonu için iyi bir uyum ile öngördüğünü göstermiştir.

Bu çalışmada, 6 farklı IGS-IAACs tarafından üretilen 11 farklı GIM'e ait GIM-TEC verileri, IGS bünyesindeki ankr istasyonundan elde edilen GNSS-TEC verileriyle istatistiksel olarak karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda tüm yılı kapsayacak şekilde yüksek güneş aktivitesinin olduğu 2013-2014 yılları ve düşük güneş aktivitesinin olduğu 2017-2018 yılları GIM-TEC ve GNSS-TEC verileri ele alınmıştır. Bu iki verinin farklarını baz alan yaklaşımlarla orta enlem bölgesinde yer alan Türkiye üzerinde farklı güneş aktivite durumlarına göre en iyi performansı gösteren GIM 'ler belirlenmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve metod

Küresel İyonosfer Haritaları temelde eşit aralıklı belirli bir enlem ve boylam boyunca ızgara şeklinde VTEC değerlerini içeren haritalardır. GNSS ölçülerinde istasyon zenitindeki TEC değerleri, ilgili epokta sinyal alınan tüm uydulardan elde edilen VTEC değerlerinin ağırlıklı ortalaması veya enterpole edilmiş değeri şeklinde elde edilir [14]. Çalışmada anlamlı bir karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla, ankr istasyonu konumundaki (39.8875°K, 32.7586°D) GIM-TEC değerleri GIM modellerinde en yakın 4 ızgara noktasından basit 4 noktadan iki değişkenli kestirim yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$VTEC(\lambda_e, \beta_e) = [1-m \quad m] \begin{bmatrix} VTEC_{00} & VTEC_{01} \\ VTEC_{10} & VTEC_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1-n \\ n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$m = |\lambda_e - \lambda_0| / \Delta\lambda_{GIM} \quad (2)$$

$$n = |\beta_e - \beta_0| / \Delta\beta_{GIM} \quad (3)$$

Eşitlik (1-3) 'de β_e ve λ_e , VTEC değeri elde edilmek istenen noktanın jeosantrik enlem ve

boylamı, β_0 ve λ_0 , noktaya en yakın ızgara noktasının jeosantrik enlem ve boylamı, $\Delta\beta_{GIM}$ ve $\Delta\lambda_{GIM}$, hesaplamada kullanılan GIM 'in enlem ve boylam boyunca mekansal çözünürlüğü (örn: 2,5° enlem ve 5° boylam), $VTEC_{00}, VTEC_{01}, VTEC_{10}, VTEC_{11}$, hesaplamada kullanılan en yakın 4 ızgara noktasının VTEC değerleridir [5].

ankr istasyonu TEC değerlerinin hesaplanmasında "faz nivelmanı" (faz ölçüleriyle yumuşatılmış kod ölçüleri) tekniği kullanılmıştır. Faz nivelmanı tekniği sürekli bir ölçme süresi boyunca kod ve faz gözlemlerinin birbirinden farkının alınması sürecine dayanır [15]. Burada L_1 ve L_2 sinyallerinin geometriden bağımsız doğrusal birleşimi ($L_4 = L_1 - L_2$) TEC hesaplamasında kullanılmaktadır.

$$L_4 = L_1 - L_2 = -\beta STEC + \lambda_1 B_{1,i}^k - \lambda_2 B_{2,i}^k \quad (4)$$

$$P_4 = P_1 - P_2 = \beta STEC + c(\Delta b^k - \Delta b_i) \quad (5)$$

Denklemlerde, $\beta = \alpha \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)$ şeklinde bir sabit sayı, $\lambda_1 B_{1,i}^k - \lambda_2 B_{2,i}^k$ başlangıç fazı belirsizliği, $\lambda B_i^k = \lambda(N_i^k + \delta N_i^k) + c(b^k + b_i)$ bias değeri, λ dalga boyu, N_i^k bir tamsayı, δN_i^k faz dönüklüğü etkisi, c ışık hızı, b^k, b_i uydu ve alıcı donanım gecikmeleri, i ve k indisleri ise sırasıyla alıcı ve uyduları temsil etmektedir. Gecikme terimleri ve tamsayı fazları pratikte ayrı şeyler değildir ve sapma belirsizlikleri olarak tanımlanırlar [16]. Taşıyıcı fazdan gelen bu belirsizlikleri azaltmak için faz nivelmanı tekniği yaygın olarak kullanılır.

$$\langle L_4, arc + P_4 \rangle_{arc} \cong \lambda_1 \delta N_1 - \lambda_2 \delta N_2 = B_4 \quad (6)$$

$$L_4 = \beta STEC + b_4^k + b_{4,i} + B_4 \quad (7)$$

Denklem (6) 'da faz belirsizliği nedeniyle oluşan sapma dengelenmektedir. Sonuç olarak STEC değeri Eşitlik (8) yardımıyla hesaplanır.

$$STEC = \beta^{-1} \left(L_4 - (B_4 + b_4^k + b_{4,i}) \right) \quad (8)$$

Donanım kaynaklı uydu (b^k) ve alıcı (b_i) gecikmeleri (DCB: Differential Code Bias) IGS ürünlerinden elde edilebilmektedir ancak IGS ağında olmayan istasyonlar için alıcı DCB değerleri ayrı olarak hesaplanmalıdır. STEC, bir haritalama fonksiyonu yardımıyla VTEC değerlerine çevrilir. Eşitlik (9) 'da çok bilinen bir haritalama fonksiyonu verilmiştir.

$$VTEC = STEC \sqrt{1 - \left(\frac{R_E}{R_E + h_m} \sin \epsilon \right)^2} \quad (9)$$

Burada ϵ uydu yükselme açısı, R_E dünyanın yarıçapı, h_m ise maksimum elektron yoğunluğunun bulunduğu iyonosfer yüksekliğidir. h_m zamana ve konuma göre değişmekle birlikte genellikle 350-450 km arasında bir değer almaktadır.

Bir veri setinin ortalama değerden farkları incelenmek istendiğinde standart sapma, iki farklı verinin birbirlerine göre farkları incelenmek istendiğinde ise RMSE değerlerinin ele alınması istatistiksel açıdan tercih edilmektedir. Burada, GNSS-TEC ve GIM-TEC değerlerinin birbirlerine görece farkları incelenmek istendiğinden RMSE değerleri dikkate alınmıştır. Ayrıca bias ve mutlak fark (ΔTEC) değerleri de karşılaştırma amacıyla kullanılan diğer yaklaşımlardır. RMSE, bias ve ΔTEC değerleri Eşitlik (10-12) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$RMSE = \sqrt{\langle (TEC_{GNSS} - TEC_{GIM})^2 \rangle} \quad (10)$$

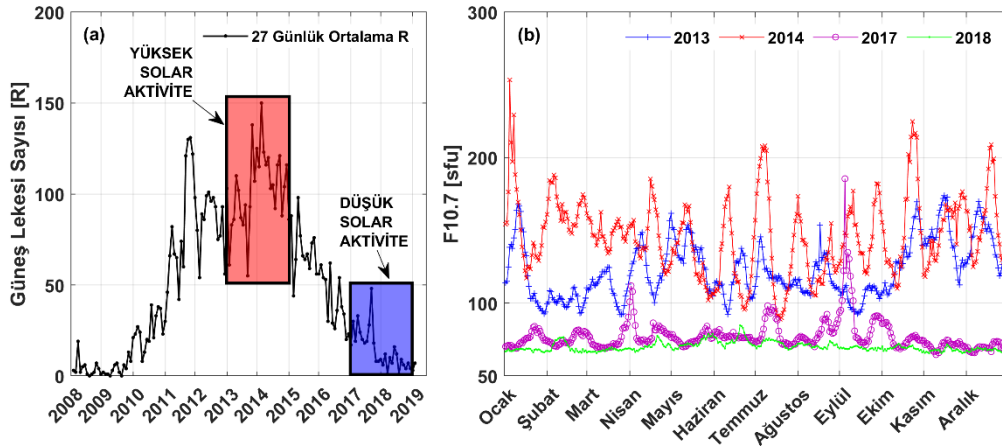
$$bias = \langle TEC_{GNSS} - TEC_{GIM} \rangle \quad (11)$$

$$\Delta TEC = |TEC_{GNSS} - TEC_{GIM}| \quad (12)$$

3. Bulgular

İyonosferdeki elektron yoğunluğu aktivitesinin ana kaynağı güneştir [17] ve güneş aktivite seviyesini temsil etmek için en çok kullanılan atmosferik indisler Güneş Lekesi Sayısı (R) ve F10.7 güneş akısıdır. [18], 2003 ila 2016 yılları arası 14 yıllık uzun dönemli bir TEC zaman serisi kullanmış ve bu verinin F10.7 indisi ile korelasyonu 0.83, R indisi ile korelasyonu 0.78 olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle çalışmada güneş aktivitesini belirlemek amacıyla F10.7 indisi tercih edilmiştir. F10.7 indisi, 2800 MHz frekanslı 10,7 cm dalga boyundaki mikrodalga akış yoğunluğunu tanımlar. İndisin birimi sfu'dur ve 1 sfu $10^{-22} W m^{-2} Hz^{-1}$ 'a eşittir [19].

Çalışmada, 24. Güneş Çevrimi döneminde F10.7 indis değerlerinin yüksek değerlerde ve değişken bir yapıda seyrettiği yani yüksek güneş aktivitesi olarak tanımlanan 2013-2014 yılları ve F10.7 değerlerinin görece daha düşük olduğu ve indis değerlerinin sakin seyrettiği yani düşük güneş aktivitesi olarak tanımlanan 2017-2018 yılları dikkate alınmıştır.



Şekil 1. a) 24. Güneş Çevrimi boyunca 27 günlük ortalama R değerleri b) 2013-2014 ve 2017-2018 yılları günlük ortalama F10.7 değerleri.

Şekil 1a 'da 24. Güneş Çevrimi boyunca 27 günlük ortalama R değerleri ve kullanılan TEC verisinin dönemleri kırmızı (yüksek güneş aktivitesi) ve mavi (düşük güneş aktivitesi) bölgelerle belirtilmiştir. Şekil 1b 'de 2013-2014 ve 2017-2018 yılları boyunca günlük ortalama F10.7 değerlerinin değişimi gösterilmiştir. Yüksek güneş aktivitesinin görüldüğü 2013-2014 yıllarında en düşük F10.7 değeri 88.9 sfu (2014 yılı 200. gün), en yüksek F10.7 değeri

253.3 sfu (2014 yılı 4. gün) olarak tespit edilmiştir. Ortalama F10.7 değeri 134.3 ± 26.3 sfu'dur. Düşük güneş aktivitesinin görüldüğü 2017-2018 yıllarında en düşük F10.7 değeri 64.6 sfu (2017 yılı 313. gün), en yüksek F10.7 değeri 185.5 sfu (2017 yılı 247. gün) olarak tespit edilmiştir. Ortalama F10.7 değeri 73.6 ± 8.8 sfu'dur. 2017-2018 yıllarındaki standart sapma değeri (8.8 sfu), 2013-2014 yıllarındaki standart sapma değeri (26.3 sfu) ile karşılaştırıldığında ilgili yıllar arasındaki güneş aktivite farkının

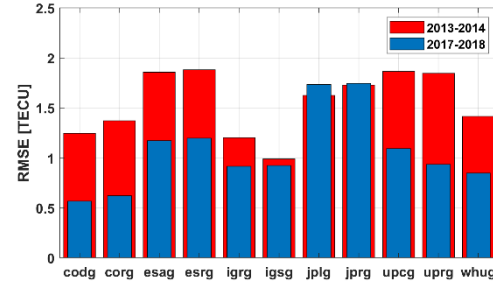
boyutu ortaya çıkmaktadır. Seçilen yıllar güneş aktivitesinin farkını ortaya çıkarabilecek seviyededir. Tablo 2 'de ilgili yıllarda F10.7 indis değerlerinin en düşük, en yüksek, ortalama ve standart sapma değerleri verilmiştir.

Tablo 2. 2013-2014 ve 2017-2018 yılları F10.7 indis değerlerinin en düşük, en yüksek, ortalama ve standart sapma değerleri

Yüksek Güneş Aktivitesi				
Yıl	En Düşük (sfu)	En Yüksek (sfu)	Ortalama (sfu)	Standart Sapma (sfu)
2013	92.0	174.0	122.7	19.5
2014	88.9	253.3	145.9	27.1
Düşük Güneş Aktivitesi				
Yıl	En Düşük (sfu)	En Yüksek (sfu)	Ortalama (sfu)	Standart Sapma (sfu)
2017	64.6	185.5	77.3	10.9
2018	65.5	84.7	69.9	3.1

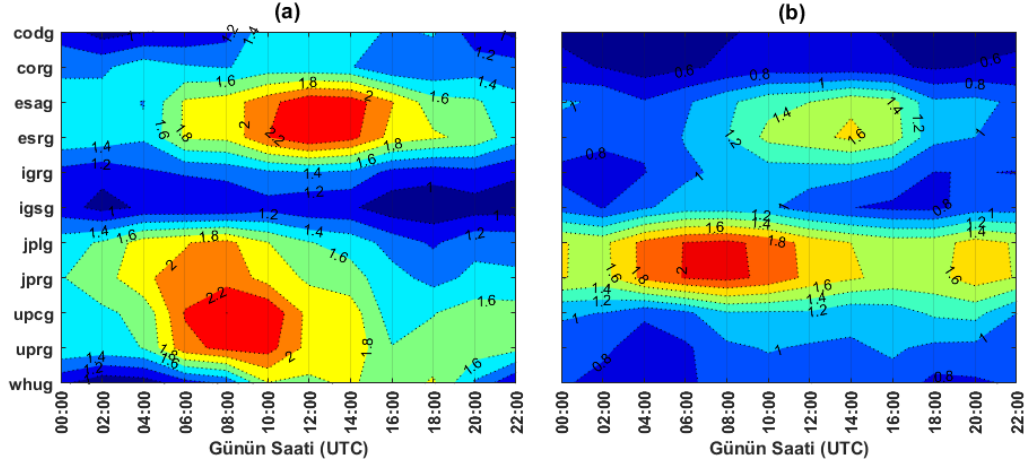
Şekil 2 'de $TEC_{GNSS}-TEC_{GIM}$ farklarının RMSE değerleri 2013-2014 ve 2017-2018 yılları için sunulmuştur. Burada, IGS (igs) ve JPL (jplg-jprg) tarafından üretilen GIM 'lerin farklı güneş aktivite seviyelerine duyarlı olmadıkları, hem düşük hem de yüksek güneş aktivitesi durumunda neredeyse aynı seviyede RMSE değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Diğer IGS-IAACs 'lar arasında düşük ve yüksek güneş aktivitesi için gözle görülür bir fark mevcuttur ve düşük güneş aktivitesinin olduğu 2017-2018

yıllarında RMSE değerleri küçülmüştür. Şekil 2 'de, yüksek güneş aktivitesinin gerçekleştiği 2013-2014 yıllarında IGS (igs), düşük güneş aktivitesinin gerçekleştiği 2017-2018 yıllarında ise CODE (codg) GIM-TEC verilerinin GNSS-TEC verileriyle en yüksek uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir.

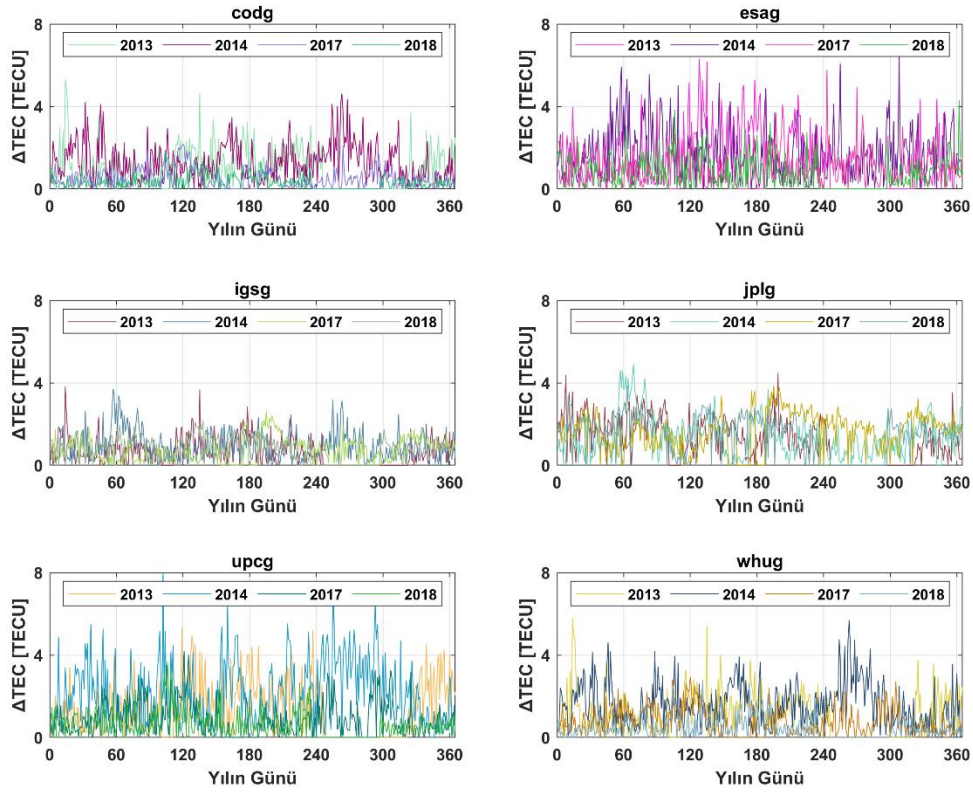


Şekil 2. 2013-2014 ve 2017-2018 yılları $TEC_{GNSS}-TEC_{GIM}$ farklarının RMSE değerleri.

Şekil 3 'de $TEC_{GNSS}-TEC_{GIM}$ farklarının gün içi 2 saat aralıklı RMSE değerleri gösterilmektedir. Buna göre güneş aktivitesinin yüksek olduğu öğle saatlerinde RMSE değerlerinin yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 3a 'da 2013-2014 yıllarında yüksek güneş aktivitesi altında tüm gün boyunca IGS (igs) tarafından üretilen GIM 'in en iyi performansı sergilediği görülmektedir. Gün içi RMSE değerlerinin yaklaşık olarak 1.2 TECU civarında olduğu tespit edilmiştir. Şekil 3b 'de 2017-2018 yıllarında düşük güneş aktivitesi altında tüm gün boyunca CODE (codg) tarafından üretilen GIM 'in en iyi performansı sergilediği görülmektedir. Gün içi RMSE değerlerinin yaklaşık olarak 0.6 TECU civarında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca gün içi RMSE değerlerinin değişimi incelendiğinde, düşük güneş aktivitesi altında genel olarak tüm gün boyunca GIM 'lerin iyi bir performans sergilediği ve RMSE değerlerinin yüksek güneş aktivitesine görece daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir.



Şekil 3. 2013-2014 (a) ve 2017-2018 (b) yılları $TEC_{GNSS} - TEC_{GIM}$ farklarının gün içi 2 saat aralıklı RMSE değerleri.



Şekil 4. 2013-2014 ve 2017-2018 yılları ΔTEC değerleri.

Şekil 4 'de çalışmada kullanılan GIM 'lerin sadece final versiyonları için 2013-2014, 2017-2018 yılları boyunca Δ TEC değerleri çizdirilmiştir. 2013-2014 yıllarında toplam 632, 2017-2018 yıllarında ise toplam 603 günde her iki veri setinde TEC verisi elde edilebilmiş ve böylece bu iki veri setinin farkları üzerinden analiz yapılabilmektedir. Genel olarak bakıldığında Δ TEC değerlerinin UPGC hariç 0-6 TECU arasında kaldığı görülmektedir. Şekil 4 'de IGS tarafından üretilen GIM 'de (igsg) diğerlerine göre daha düşük mutlak farkların oluştuğu tespit edilmiştir.

Tablo 3 'de 2013-2014 ve 2017-2018 yılları $TEC_{GNSS}-TEC_{GIM}$ verileri arasındaki RMSE ve bias değerleri özetlenmiştir. Ortalama RMSE ve bias değerleri incelendiğinde düşük güneş aktivitesinde yüksek güneş aktivitesine göre $TEC_{GNSS}-TEC_{GIM}$ farklarında azalma meydana geldiği görülmüştür. 2013-2014 yıllarında GIM 'lerin ortalama RMSE değeri 1.55 TECU ve ortalama bias değeri 1.24 TECU, 2017-2018 yıllarında ise ortalama RMSE değeri 1.07 TECU ve ortalama bias değeri 0.89 TECU olarak tespit edilmiştir.

Tablo 3. 2013-2014 ve 2017-2018 yılları $TEC_{GNSS}-TEC_{GIM}$ karşılaştırma sonuçları

GIM	Yüksek Güneş Aktivitesi		Düşük Güneş Aktivitesi	
	RMSE (TECU)	bias (TECU)	RMSE (TECU)	bias (TECU)
codg	1.25	0.98	0.57	0.45
corg	1.37	1.10	0.62	0.49
esag	1.86	1.43	1.17	0.91
esrg	1.88	1.46	1.20	0.94
igr	1.20	0.96	0.92	0.74
igsg	0.99	0.79	0.92	0.78
jplg	1.62	1.38	1.73	1.59
jprg	1.73	1.48	1.75	1.61
upcg	1.87	1.47	1.09	0.86
uprg	1.85	1.50	0.93	0.75
whug	1.41	1.10	0.85	0.67
Ort.	1.55	1.24	1.07	0.89

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada orta enlem bölgesinde yer alan Türkiye 'de düşük ve yüksek güneş aktivitesi altında 6 farklı kurum/kuruluş tarafından üretilen 11 farklı GIM 'in performansları IGS 'e ait ankr istasyonu GNSS-TEC değerleriyle karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla düşük güneş aktivitesinin gerçekleştiği 2013-2014 yılları ve yüksek güneş aktivitesinin gerçekleştiği 2017-2018 yılları GNSS-TEC ve GIM-TEC değerleri kullanılmıştır. Performans analizi her iki veri setinin farkları, farkların RMSE ve bias değerleri dikkate alınarak yapılmıştır. Sonuçlar, orta enlem bölgesinde 2013-2014 yıllarındaki karşılaştırmaya göre düşük güneş aktivitesinin olduğu dönemlerde IGS ve 2017-2018 yıllarındaki karşılaştırmaya göre yüksek güneş aktivitesinin olduğu dönemlerde CODE tarafından üretilen GIM 'lerin kullanılmasının daha uygun olacağını göstermiştir.

Çalışma, özellikle iyonosferik açıdan farklılık gösteren düşük, orta ve yüksek enlem bölgelerinde bu tarz karşılaştırmalı analizlerle en uygun GIM 'in belirlenmesinin önemini ortaya koymuştur. Temelde ortak veri setini kullanmalarına karşın farklı yöntemlerle küresel ölçekte iyonosferik model üreten IGS-IAACS bağlı kurum/kuruluşların güneş aktivitesi, zaman ve konuma göre farklı kalitede veri ürettikleri açıktır. İyonosferik model üretimindeki bu farklı yaklaşımlar muhakkak farklı ihtiyaçlara uygun şekilde oluşmaktadır. Ayrıca gelişen teknolojiyle birlikte hesaplama teknik ve araçlarında meydana gelen değişimlerde bu farklılığa neden olmaktadır.

GIM 'ler temelde dünya üzerine yayılmış ve sürekli ölçüm yapan GNSS alıcılarından ve altimetre uydularından hesaplanan sinyal bazlı STEC/VTEC değerlerini model girdisi olarak kullanmaktadır. Bu nedenle her iki veri seti arasında yüksek dereceden bir korelasyon olabileceği unutulmamalıdır. Bu kapsamda bundan sonraki çalışmalarda GIM verisiyle karşılaştırmak amacıyla TOPEX, JASON-1, JASON-2, COSMIC vb. altimetre uydularında elde edilecek VTEC değerlerinin de kullanılması önemle tavsiye edilmektedir.

Teşekkür

RINEX verilerini ücretsiz sunan IGS 'e, ankr istasyonu kurulum ve işletilmesinde yetkili Harita Genel Müdürlüğü'ne, IONEX ve güneş aktivite indis verilerini ücretsiz sunan NASA'ya ve katkıları nedeniyle editör ve isimsiz hakemlere teşekkür ederim.

Kaynakça

- [1] Alizadeh M., Schuh H., Todorova S., Schmidt M. 2011. Global Ionospheric Maps of VTEC from GNSS, Satellite Altimetry and FORMOSAT-3/COSMIC Data. *Journal of Geodesy*, Cilt. 85, s. 975-987. DOI: 10.1007/s00190-011-0449-z
- [2] Hein, W. Z., Goto, Y., Kasahara, Y. 2016. Estimation method of ionospheric TEC distribution using single frequency measurements of GPS signals. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Cilt. 7, s. 1-6. DOI: 10.14569/IJACSA.2016.071201
- [3] Li, M., Zhang, B., Yuan, Y., Zhao, C. 2019. Single-frequency precise point positioning (PPP) for retrieving ionospheric TEC from BDS B1 data. *GPS Solutions*, Cilt. 23, s. 1-11. DOI: 10.1007/s10291-018-0810-2
- [4] Feltens, J., Schaer, S. 1998. IGS Products for the Ionosphere. In *Proceedings of the 1998 IGS Analysis Center Workshop Darmstadt, Germany*.
- [5] Schaer, S., Gurtner, W., Feltens, J. 1998. IONEX: The ionosphere map exchange format version 1. In *Proceedings of the IGS AC workshop, Darmstadt, Germany*.
- [6] Li, M., Yuan, Y., Wang, N., Li, Z., Huo, X. 2018. Performance of various predicted GNSS global ionospheric maps relative to GPS and JASON TEC data. *GPS Solutions*, Cilt. 22, s. 1-11. DOI: 10.1007/s10291-018-0721-2
- [7] Hernández-Pajares M., Juan J. M., Sanz J., Orús R., García-Rigo A., Feltens J., Komjathy A., Schaer S. C., Krankowski A. 2009. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *Journal of Geodesy*, Cilt. 83, s. 263-275. DOI: 10.1007/s00190-008-0266-1
- [8] Orús, R., Hernández-Pajares, M., Juan, J. M., Sanz, J., García-Fernández, M. 2002. Performance of different TEC models to provide GPS ionospheric corrections. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Cilt. 64, s. 2055-2062. DOI: 10.1016/S1364-6826(02)00224-9
- [9] Luo, W., Liu, Z., Li, M. 2014. A preliminary evaluation of the performance of multiple ionospheric models in low-and mid-latitude regions of China in 2010-2011. *GPS Solutions*, Cilt. 18, s. 297-308. DOI: 10.1007/s10291-013-0330-z
- [10] Xiang, Y., Yuan, Y., Li, Z., Wang, N. 2015. Analysis and validation of different global ionospheric maps (GIMs) over China. *Advances in Space Research*, Cilt. 55, s. 199-210. DOI: 10.1016/j.asr.2014.09.008
- [11] Roma-Dollase, D., Hernández-Pajares, M., Krankowski, A., Kotulak, K., Ghoddousi-Fard, R., Yuan, Y., Li, Z., Zhang, H., Shi, C., Wang, C., Feltens, J., Vergados, P., Komjathy, A., Schaer, S., García-Rigo, A., Gómez-Cama, J. M. 2018. Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle. *Journal of Geodesy*, Cilt. 92, s. 691-706. DOI: 10.1007/s00190-017-1088-9
- [12] Inyurt, S., Yildirim, O., Mekik, C. 2017. Comparison between IRI-2012 and GPS-TEC observations over the western Black Sea. In *Annales Geophysicae*, Cilt. 35, s. 817-824. DOI: 10.5194/angeo-35-817-2017
- [13] Inyurt, S., Sekertekin, A. 2019. Modeling and predicting seasonal ionospheric variations in Turkey using artificial neural network (ANN). *Astrophysics and Space Science*, Cilt. 364, s. 1-8. DOI: 10.1007/s10509-019-3545-9
- [14] Şentürk, E., Çepni, M. S. 2019. Performance of different weighting and surface fitting techniques on station-wise TEC calculation and modified sine weighting supported by the sun effect. *Journal of Spatial Science*, Cilt. 64, s. 209-220. DOI: 10.1080/14498596.2017.1417169
- [15] Ciraolo, L., Azpilicueta, F., Brunini, C., Meza, A., Radicella, S. M. 2007. Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS. *Journal of Geodesy*, Cilt. 81, s. 111-120. DOI: 10.1007/s00190-006-0093-1
- [16] Mannucci A. J., Wilson B. D., Yuan D. N., Ho C. H., Lindqwister U. J., Runge T. F. 1998. A Global Mapping Technique for GPS-Derived Ionospheric Total Electron Content Measurements. *Radio Science*, Cilt. 33, s. 565-582. DOI: 10.1029/97RS02707
- [17] Salinas, A., Toledo-Redondo, S., Navarro, E. A., Fornieles-Callejón, J., Portí, J. A. 2016. Solar storm effects during Saint Patrick's Days in 2013 and 2015 on the Schumann resonances measured by the ELF station at Sierra Nevada (Spain). *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Cilt. 121, s. 234-246. DOI: 10.1002/2016JA023253
- [18] Şentürk, E., Çepni, M. S. 2018. Ionospheric temporal variations over the region of Turkey: a study based on long-time TEC observations. *Acta Geodaetica et Geophysica*, Cilt. 53, s. 623-637. DOI: 10.1007/s40328-018-0233-0
- [19] Tapping, K. F. 2013. The 10.7 cm solar radio flux (F10.7). *Space Weather*, Cilt. 11, s. 394-406. DOI: 10.1002/swe.20064