



Kara ve Havacılık Haberleşmeleri İle İlişkili İyonosferik HF Tahminleri Üzerine Jeomanyetik Etkiler

Erdinç TİMOÇİN^{1,}, İbrahim ÜNAL²*

¹ Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Teknik Bilimler MYO, Mersin Üniversitesi, 33343, Mersin, Türkiye

² Matematik ve Fen Bilimleri Eğitimi Bölümü, Eğitim Fakültesi, İnönü Üniversitesi, 44280, Malatya, Türkiye

Özet

Bu çalışmada, 23. Güneş döngüsünün maksimumu boyunca orta enlemlerde IRI-2016'nın foF2 tahminleri üzerine jeomanyetik fırtınaların etkisi araştırılmıştır. Bunun için, 2000 yılı boyunca Roma ve Juliusruh iyonsonda istasyonlarından alınan ve aynı konumlar için IRI-2016'dan hesaplanan saatlik foF2 verileri kullanılmıştır. 3 saatlik gezegensel jeomanyetik aktivite indisi (3h-K_p) jeomanyetik aktivite göstergesi olarak kullanılmıştır. Jeomanyetik fırtınalı dönemler boyunca IRI-2016'nın performansını test etmek için iyonsonda istasyonlarından ölçülen gerçek foF2 verileri ve IRI-2016'dan hesaplanan tahmini foF2 değerleri kullanılarak yüzdeler sapma değerleri hesaplanmıştır. Bu analizler, ekinokslar (21 Mart, 23 Eylül) ve gündönümleri (21 Haziran, 21 Aralık) civarında jeomanyetik fırtınalı günler temel alınarak dört mevsim için yapılmıştır. Analiz sonuçlarından, jeomanyetik fırtınalı dönemler boyunca IRI-2016 foF2 tahminlerinin, iyonsonda istasyonlarından ölçülen gerçek foF2 değerlerinden büyük ölçüde saptığı ve bu sapmaların mevsimlere ve enlem değerine bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: İyonosfer, Kritik frekans, IRI-2016, Jeomanyetik fırtınalar, Yüzdeler sapma

Geomagnetic Effects on the Ionospheric HF Predictions Related to Ground and Aviation Communications

Abstract

In this study, the effect of geomagnetic storms on the IRI-2016 foF2 predictions is investigated at middle latitudes during the maximum of the solar cycle 23. For this purpose, hourly foF2 data measured from the ionosonde stations Rome and Juliusruh for the year 2000 and hourly foF2 data calculated from IRI-2016 for the same locations and year are used. Planetary geomagnetic activity "3h-K_p" indices are used as a geomagnetic activity indicator. In order to test performance of the IRI-2016 for disturbed geomagnetic conditions, the percentile deviations is calculated using the estimated foF2 data from IRI-2016 and the real foF2 data from the ionosonde stations during the geomagnetic storms. This analysis is done for four seasons based on geomagnetic stormy days around equinoxes (March 21, September 23) and solstices (June 21, December 21). From these results, it is found that IRI-2016 foF2 predictions deviate considerably from the real foF2 data the ionosonde stations during geomagnetic disturbed periods and this deviations differ according to the seasons and latitude value.

Keywords: Ionosphere, Critical frequency, IRI-2016, Geomagnetic storms, Percentile deviation.

* Sorumlu Yazar: erdinctimocin@mersin.edu.tr

1. Giriş

Jeomanyetik fırtına, Güneş rüzgârları ile büyük miktarlarda enerji girişinin Dünya'nın manyetosferinde meydana getirdiği düzensizliktir. Bir jeomanyetik fırtına boyunca, Güneş rüzgârlarındaki yüksek enerjili parçacıklar manyetik alanlar boyunca taşınarak Dünya'nın kutup bölgelerine büyük miktarda kütle ve enerji girişine neden olurlar [1, 2]. Manyetosferde tutulan enerjili parçacıklar Dünya'nın manyetik alanını, iyonosferdeki iyonlaşmayı, radyasyondaki değişiklikleri ve ısınmayı beraberinde getirir. Bu da atmosferin büyük ölçekli dinamiklerine yön verir. Bu dinamikler; uyduları, uzaydaki insan etkinliklerini, haberleşmeyi, iklimi, elektrik hatlarını ve dolayısıyla raylı taşıma ve boru hatları gibi sistemleri etkilemektedirler. Böylece manyetosferik ve iyonosferik değişimler, havacılık sektöründeki biyolojik ve teknolojik sistemler üzerindeki muhtemel etkilerin tahminini yapmada son derece önem taşımaktadır [1-4].

Bunlara ek olarak, jeomanyetik fırtınalar süresince iyonosferin F2 bölgesindeki elektron yoğunluğunun nasıl değiştiğini bilmekte çok önemlidir. Çünkü iyonosferin bu bölgesi, yüksek frekanslı dalgalar ile yapılan sivil ve askeri haberleşmelerde çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Jeomanyetik fırtınaların yoğunluğu ve zamana bağlı değişimi, farklı enlemlerde ve farklı yüksekliklerde farklılıklar göstermektedir. Jeomanyetik fırtınalar boyunca günün farklı zamanlarında elektron yoğunluğu değerlerini doğru ve etkili bir şekilde tahmin etmek için birtakım deneysel iyonosferik modeller geliştirilmiştir. İyonosferin maksimum elektron yoğunluğuna sahip F2 bölgesinden yansıyabilen kritik frekansı (foF2) tahmin etmek için kullanılan en yaygın model, Uzay Araştırmaları Komitesi (COSPAR) ve Uluslararası Radyo Bilimleri Birliği (URSI) tarafından desteklenen International Reference Ionosphere (IRI) Modeli'dir. Bu kuruluşlar, mevcut tüm veri kaynaklarından yola çıkarak, iyonosferin deneysel standart bir modelini üretmek için 1960'dan itibaren çalışmaktadırlar. IRI modeli, herhangi bir coğrafik konum, yer, saat ve tarihte 50 km ile 2000 km arasındaki herhangi bir yükseklik için, elektron yoğunluğu, elektron

sıcaklığı, iyon sıcaklığı ve iyon bileşenleri gibi iyonosferik parametrelerin değerlerini tahmin etmesine rağmen, en etkili olduğu bölge orta enlem (30°-60° coğrafik enlemler arası) bölgesidir [5-13]. İyonosferik modeller için en önemli problemlerden biri, jeomanyetik fırtına koşullarında iyonosferik parametrelerin doğru bir şekilde tahmin edilmesidir. Fırtına koşullarında meydana gelen manyetosfer, iyonosfer ve termosfer sistemindeki süreçlerin karmaşıklığı, iyonosferik parametrelerin modellenmesini oldukça zor hale getirmektedir [14]. Jeomanyetik aktif koşullar için iyonosferik parametreleri tahmin eden modellerden biri, son jeomanyetik aktivite parametreleri eklenerek geliştirilen IRI-2016 modelidir. IRI-2016, jeomanyetik aktif koşullar boyunca iyonosferdeki fırtına değişikliklerini hesaba katmak için, 33 saat boyunca a_p indisinden elde edilen yeni bir jeomanyetik indisi kullanılmaktadır. IRI'nın ilk oluşturulmasından bu yana, tahmin kabiliyetini geliştirmek için periyodik değişiklikler yapılmıştır. IRI-2016, şu anda modelin en son sürümüdür [15-21].

Bu çalışmanın amacı, maksimum Güneş aktivitesinin gözlemlendiği 2000 yılının değişik mevsimleri için jeomanyetik aktif durumlar boyunca IRI-2016 foF2 tahminlerinin orta enlemlerdeki performansı üzerinde jeomanyetik fırtınaların etkilerini araştırmaktır. Sonuçlar, jeomanyetik aktif durumlar boyunca mevsimlere ve enlemlere bağlı olarak IRI-2016 foF2 tahminlerinin performansı hakkında önemli bilgiler verebilir ve IRI modelin geliştirilmesine katkı sağlayabilir.

2. Materyal ve Yöntem

Orta enlemlerde IRI-2016 saatlik foF2 tahminlerinin performansı üzerine jeomanyetik fırtınaların etkisini araştırmak için, orta enlemlerde bulunan Roma ve Juliusruh iyonosonda istasyonlarından alınan saatlik gerçek foF2 verileri ve aynı konumlar için IRI-2016 modeli kullanılarak hesaplanmış tahmini saatlik foF2 verileri kullanılmıştır. Bu istasyonların coğrafik enlemleri ve boylamları Tablo 1'de verilmiştir. Buna ek olarak, aynı yıl için jeomanyetik aktivite seviyesini belirleyen 3 saatlik gezegensel jeomanyetik aktivite indisi (K_p) verileri kullanılmıştır.

Tablo 1. İstasyonların coğrafik enlem ve boylam değerleri.

İstasyon Adı	Coğrafik Enlem	Coğrafik Boylam
Roma	41,8° K	12,5° D
Juliusruh	54,6° K	13,4° D

İyonosondalardan ölçülen saatlik foF2 verileri ile 3 saatlik K_p verileri, etkileşimli fizik veri merkezinden (SPIDR) alınmıştır [22]. Aynı yıl ve konumlar için IRI-2016 modeli kullanılarak hesaplanan tahmini saatlik foF2 değerleri ise uzay fiziği veri kuruluşundan (SPDF) elde edilmiştir [23]. 2000 yılı, maksimum güneş lekesine sayısına sahip olması ve özellikle Ekinokslar (21 Mart, 23 Eylül) ve gündönümleri (21 Haziran, 21 Aralık) civarında büyük jeomanyetik fırtınaların gözlemlenmesinden dolayı analizlerde bu yıla ait veriler kullanılmıştır. Ayrıca bu yıl, istasyonlardan en doğru ve eksiksiz foF2 verilerinin alındığı yıldır.

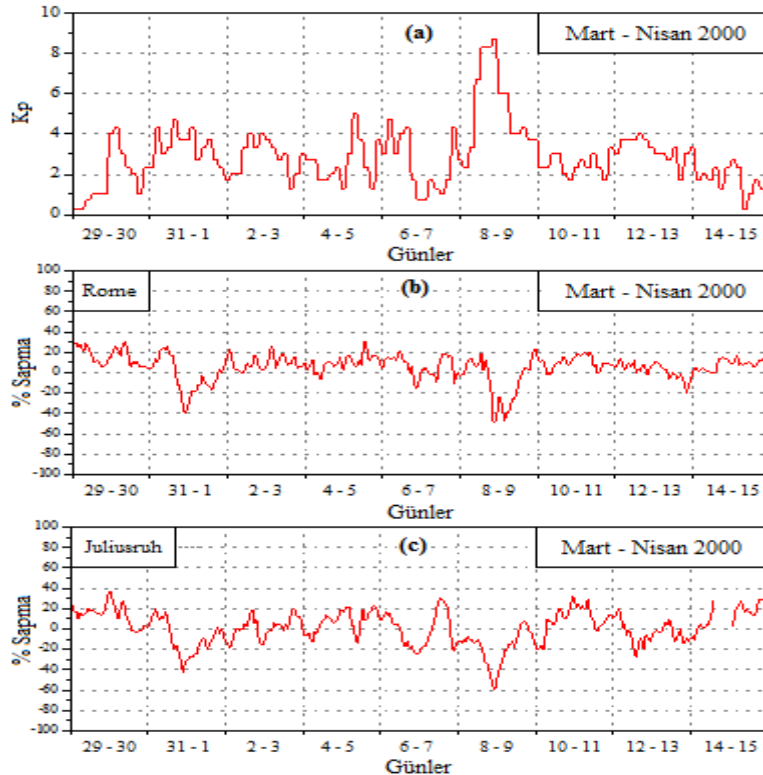
IRI-2016'nın jeomanyetik fırtınalar boyunca performansını test etmek için yüzdelik sapmalar,

3. Bulgular ve Tartışma

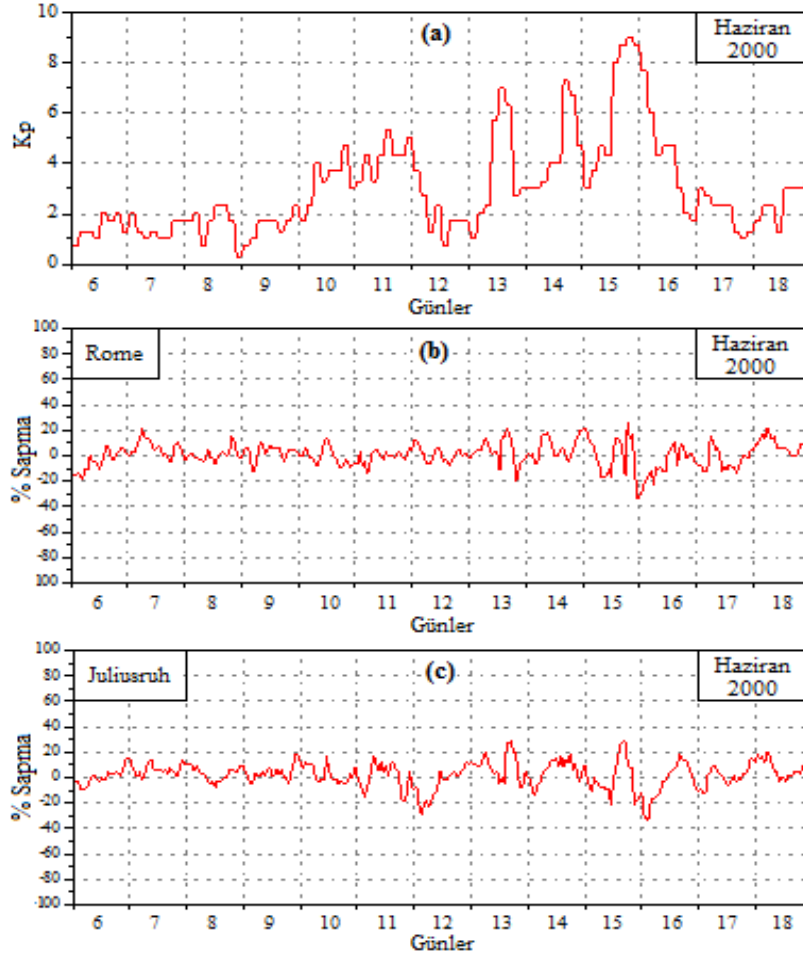
farklı mevsimlerde iyonosonda istasyonlarından alınan saatlik foF2 verileri ve aynı konumlar için IRI-2106 modelinden hesaplanmış foF2 değerleri denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Sapma} = \frac{X_{foF2}^G - X_{foF2}^T}{X_{foF2}^T} \times 100 \quad (1)$$

Denklemdaki X_{foF2}^G ve X_{foF2}^T sırasıyla, iyonosondalardan ölçülen gerçek foF2 değerlerini ve IRI-2016'dan hesaplanan tahmini foF2 değerlerini göstermektedir. Bu analiz, her bir istasyon için ekinokslar (21 Mart, 23 Eylül) ve gündönümleri (21 Haziran, 21 Aralık) civarında jeomanyetik fırtınalı günler temel alınarak dört mevsim için yapılmıştır. Farklı mevsimlerde her bir istasyon için hesaplanan yüzdelik sapma değerlerinin grafikleri çizdirilmiştir. Sonuçlar, enlemsel ve mevsimsel değişikliklere göre birbirleriyle karşılaştırılmıştır.



Şekil 1. 29 Mart-15 Nisan 2000 boyunca; (a) gezegensel jeomanyetik aktivite indisinin (K_p) değişimi (b) Roma için hesaplanan yüzdelik sapmaların değişimi (c) Juliusruh için hesaplanan yüzdelik sapmaların değişimi.



Şekil 2. 6-18 Haziran 2000 boyunca; (a) gezegensel jeomanyetik aktivite indisinin (K_p) değişimi (b) Roma için hesaplanan yüzdelik sapmaların değişimi (c) Juliusruh için hesaplanan yüzdelik sapmaların değişimi.

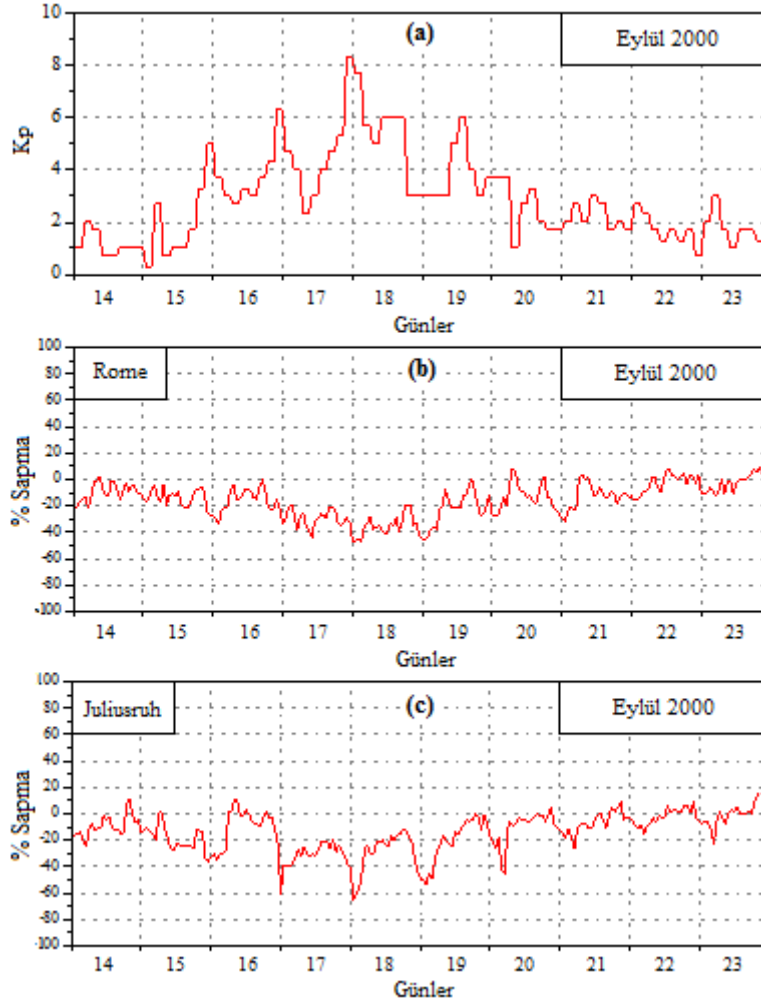
Şekil 1-4, sırasıyla 2000 yılının Mart, Haziran, Eylül ve Kasım dönemleri için jeomanyetik aktivite indisinin, Roma ve Juliusruh iyonsonda istasyonları için hesaplanan yüzdelik sapma değerlerinin değişimlerini göstermektedir.

Şekil 1(a)'dan, 8-9 Nisan arasında çok şiddetli bir jeomanyetik fırtınanın meydana geldiği ve K_p değerinin 9'a kadar ulaştığı görülmektedir. Şekil 1 (b) ve (c)'deki yüzdelik sapma değerlerini incelediğimizde, her iki istasyon için de IRI-2016 foF2 tahminlerindeki en büyük sapmaların jeomanyetik fırtınanın en şiddetli olduğu 8-9 Nisan arasında meydana geldiği görülmektedir.

Bu tarihler boyunca, enlem değeri daha büyük olan Juliusruh istasyonunun konumu için IRI-2016'nın foF2 tahminlerinde yaklaşık % 60'lık negatif maksimum sapma meydana gelirken, daha düşük enlemden bulunan Roma istasyonunun

konumu için IRI-2016 foF2 tahminlerinde yaklaşık % 48'lik negatif maksimum sapma meydana gelmiştir. Bu sonuçlar, jeomanyetik aktivitenin çok büyük olduğu bu dönemler boyunca iyonsondalar tarafından ölçülen gerçek foF2 değerlerinin, IRI-2016'nın tahmini foF2 değerlerinden küçük olduğunu göstermektedir. Ayrıca, jeomanyetik fırtınalı günlerde IRI-2016 foF2 tahminlerindeki yüzdelik sapma değerlerinin, düşük enlemlerden yüksek enlemlere doğru gidildikçe önemli derecede arttığı ve IRI-2016 foF2 tahminlerindeki maksimum sapmaların gözlemlenme süresinin arttığı Şekil 1(b) ve (c)'de net bir şekilde görülmektedir.

Şekil 2 (a)'dan, 13-16 Haziran arasında çok şiddetli bir jeomanyetik fırtınanın meydana geldiği ve K_p değerinin 15-16 Haziran arasında yaklaşık 9'a kadar ulaştığı görülmektedir.

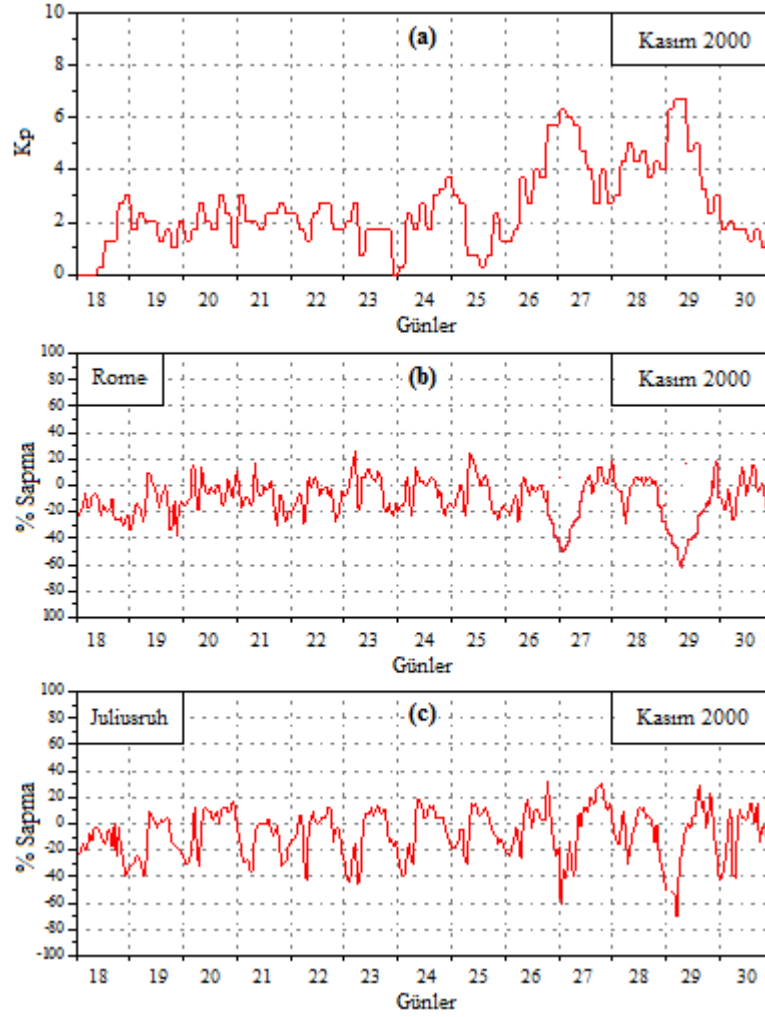


Şekil 3. 14-23 Eylül 2000 boyunca; (a) gezegensel jeomanyetik aktivite indisinin (K_p) değişimi (b) Roma için hesaplanan yüzdeler sapmaların değişimi (c) Juliusruh için hesaplanan yüzdeler sapmaların değişimi.

Yüzdeler sapmaların değişimleri incelendiğinde, jeomanyetik fırtına boyunca her iki istasyon konumu için yüzdeler sapmaların yaklaşık $\pm\%$ 30'luk aralıkta değerlere sahip oldukları görülmektedir. Yani, diğer mevsimlere göre Haziran dönemindeki jeomanyetik fırtınalar boyunca, IRI-2016 modelinin tahmini foF2 değerleri, iysonda istasyonlarından ölçülen gerçek foF2 değerlerine yakındır.

Şekil 3 (a) incelendiğinde, 15-19 Eylül arasında çok şiddetli bir jeomanyetik fırtınanın meydana geldiği ve K_p değerinin 17-18 Eylül arasında yaklaşık 8,3'e kadar ulaştığı görülmektedir. Her iki istasyon için yüzdeler sapmaların değişimleri incelendiğinde en büyük sapmaların jeomanyetik fırtınanın en büyük değerine ulaştığı günlerde meydana geldiği görülmektedir. Bu tarihler

boyunca, enlem değeri daha büyük olan Juliusruh istasyonunun konumu için IRI-2016'nın foF2 tahminlerinde yaklaşık % 65'lik negatif maksimum sapma meydana gelirken, daha düşük enlemlerde bulunan Roma istasyonunun konumu için IRI-2016 foF2 tahminlerinde yaklaşık % 50'lik negatif maksimum sapma meydana gelmiştir. Yani, Mart dönemine benzer şekilde jeomanyetik fırtınalı günlerde, IRI-2016 foF2 tahminlerindeki yüzdeler sapma değerlerinin, düşük enlemlerden yüksek enlemlere doğru gidildikçe önemli derecede arttığı bulunmuş ve yüksek enlemlere doğru gidildikçe IRI-2016'nın foF2 tahminlerinde büyük sapmaların gözlemlenme süresinin de arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 4. 18-30 Kasım 2000 boyunca; (a) gezegensel jeomanyetik aktivite indisinin (K_p) değişimi (b) Roma için hesaplanan yüzdelik sapmaların değişimi (c) Juliusruh için hesaplanan yüzdelik sapmaların değişimi.

Şekil 4 (a) incelendiğinde, 26-29 Kasım arasında iki tane şiddetli jeomanyetik fırtınanın meydana geldiği ve bu dönem boyunca K_p değerinin 29 Kasım da yaklaşık 7'ye kadar ulaştığı görülmektedir. Her iki istasyon için de yüzdelik sapmaların değişimleri incelendiğinde, Mart ve Eylül dönemlerine benzer şekilde en büyük sapmaların, jeomanyetik fırtınanın en büyük değerine ulaştığı günlerde meydana geldiği görülmektedir. Jeomanyetik sakin günler boyunca yüzdelik sapmalar yaklaşık $\pm\% 40$ arasındaki değerlerde değişirken, jeomanyetik fırtınanın meydana geldiği günler boyunca Juliusruh istasyonunun konumu için IRI-2016'nın foF2 tahminlerinde yaklaşık $\% 70$ 'lik negatif maksimum sapma, daha düşük enlemde bulunan Roma istasyonunun konumu için yaklaşık $\% 60$ 'lik

negatif maksimum sapma meydana gelmiştir. Mart ve Eylül dönemlerine benzer şekilde jeomanyetik fırtınalı günlerde, IRI-2016 foF2 tahminlerindeki yüzdelik sapma değerlerinin, düşük enlemlerden yüksek enlemler doğru gidildikçe önemli derecede arttığı bulunmuştur. Ayrıca, yüksek enlemlere doğru gidildikçe, IRI-2016'nın foF2 tahminlerindeki büyük sapmaların gözlemlenme sürelerinin de arttığı tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 2000 yılının farklı mevsimleri için jeomanyetik fırtınalı dönemler boyunca orta enlemlerde IRI-2016 foF2 tahminlerinin performansı üzerine jeomanyetik fırtınaların etkileri araştırılmıştır.

Analiz sonuçlarına göre, jeomanyetik fırtınalı dönemler için IRI-2016 foF2 tahmini değerlerinin, iyonosonda istasyonları tarafından ölçülen gerçek foF2 değerlerinden büyük ölçüde saptığı ve bu sapmaların mevsimlere ve enlemlere göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Her iki istasyon konumu için de, IRI-2016 foF2 tahminlerinde tespit edilen en büyük sapmaların tüm mevsimler için jeomanyetik fırtınanın en şiddetli olduğu günlerde meydana görülmüştür. Jeomanyetik aktivitenin çok büyük olduğu bu dönemler boyunca IRI-2016'nın tahmini foF2 değerlerinin iyonosondalar tarafından ölçülen gerçek foF2 değerlerinden küçük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, foF2 tahmini yapılan enlem arttıkça IRI-2016 foF2 tahminlerindeki yüzdelik sapmaların arttığı gözlemlenmiştir. Bu sonuç, yüksek derecede dinamik olan yüksek enlem bölgelerinin doğru şekilde modellenmesinin IRI gibi veri tabanlı modeller için hala büyük bir zorluk olduğunu göstermektedir. Çünkü Dünya'nın yüksek enlem bölgesindeki iyonosfer-termosfer sisteminin kimyasal ve dinamik yapısını önemli şekilde değiştiren açık manyetik alan çizgileri ve parçacık yağışı gibi fiziksel süreçler henüz tam olarak anlaşılamamış ve modellenememiştir. Jeomanyetik fırtınalı günler boyunca IRI-2016 foF2 tahminlerinin performansı, mevsimsel değişime bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Haziran dönemi, yüzdelik sapmaların en küçük değerlere sahip olduğu mevsim iken, Aralık dönemi ise yüzdelik sapmaların en büyük değerlere sahip olduğu mevsimdir.

Bu sonuçlar, foF2 fırtına modelini içeren son IRI-2016 modelinin jeomanyetik fırtınalar boyunca iyonosferin gerçek koşullarını tam olarak modellemekte yeterli olmadığını ve jeomanyetik fırtınalı dönemler için iyonosferik parametrelerin daha doğru tahmin edilebilmesi için IRI-2016 modelinin hala geliştirilmeye ihtiyacı olduğunu ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

- [1] R. W. Schunk, and A. F. Nagy, Ionospheres. New York, USA: Cambridge University Press, 2000.
- [2] G. W. Prölss, Physics of the Earth's Space Environment. New York, USA: Springer-Verlag Press, 2004.
- [3] A. J. Mannucci, B. T. Tsurutani, B. A. Iijima, A. Komjathy, A. Saito, W. D. Gonzalez, F. L. Guarnieri, J. U. Kozyra, and R. Skoug, "Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29-30, 2003 Halloween Storms", Geophys. Res. Lett., 32, L12S02-L12S06, 2005.
- [4] B. Zhao, W. Wan, L. Liu, K. Igarashi, K. Yumoto, and B. Ning, "Ionospheric response to the geomagnetic storm on 13-17 April 2006 in the West Pacific region", J. Atmosf. and Solar-Terr. Phys., 71, 88-100, 2009.
- [5] D. Bilitza, "International Reference Ionosphere-Status 1995/96", Adv. Space Res., 20(9), 1751-1754, 1997.
- [6] M. L. Zhang, J. K. Shi, X. Wang, S. Z. Wu, and S. R. Zhang, "Comparative study of ionospheric characteristic parameters obtained by DPS-4 digisonde with IRI-2000 for low latitude station in China", Adv. Space Res., 33, 869-873, 2004.
- [7] D. Bilitza, and B. W. Reinisch, "International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters", Adv. Space Res., 42, 599-609, 2008.
- [8] X. Wang, J. K. Shi, G. J. Wang, and Y. Gong, "Comparison of ionospheric F2 peak parameters foF2 and hmF2 with IRI2001 at Hainan", Adv. Space Res., 43, 1812-1820, 2009.
- [9] D. Bilitza, and B. Reinisch, "Representation of the auroral and polar ionosphere in the International Reference Ionosphere (IRI)", Adv. Space Res., 51, 535, 2013.
- [10] I. E. Zakharenkova, A. Krankowski, D. Bilitza, I. V. Cherniak, I. I. Shagimuratov, and R. Sieradzki, "Comparative study of foF2 measurements with IRI-2007 model predictions during extended solar minimum", Adv. Space Res., 51, 620-629, 2013.

- [11] D. Bilitza, "The International Reference Ionosphere: Rawer's IRI and its status today", *Adv. Radio Sci.*, 12, 231-236, 2014,
- [12] S. Kumar, A. K. Singh, and J. Lee, "Equatorial Ionospheric Anomaly (EIA) and comparison with IRI model during descending phase of solar activity (2005-2009)", *Adv. Space Res.*, 53(5), 724-733, 2014.
- [13] P. P. Chaitanya, A. K. Patra, N. Balan, and S. V. B. Rao, "Ionospheric variations over Indian low latitudes close to the equator and comparison with IRI-2012", *Ann. Geophys.*, 33, 997-1006, 2015.
- [14] Y. J. Chuo, "Variations of ionospheric profile parameters during solar maximum and comparison with IRI-2007 over Chung-Li, Taiwan", *Ann. Geophys.*, 30, 1249-1257, 2012.
- [15] D. Bilitza, "International Reference Ionosphere 2000", *Radio Sci.*, 36(2), 261-275, 2001.
- [16] T. J. Fuller-Rowell, M. V. Codrescu, and E. A. Araujo-Pradere, "Capturing the storm-time ionospheric response in an empirical model in Space Weather", AGU, 321 Washington, D. C., 393-401, 2001.
- [17] E. A. Araujo-Pradere, T. J. Fuller-Rowell, and M. V. Codrescu, "STORM: An empirical storm-time ionospheric correction model: 1. Model description", *Radio Sci.*, 37(5), 269 1070-1082, 2002.
- [18] E. A. Araujo-Pradere, T. J. Fuller-Rowell, M. V. Codrescu, and D. Bilitza, "Characteristics of the ionospheric variability as a function of season, latitude, local time, and geomagnetic activity", *Radio Sci.*, 40, RS5009, 1-15, 2005.
- [19] A. O. Adewale, E. O. Oyeyemi, A. B. Adeloye, and M. B. Adedokun, "Ionospheric effects of geomagnetic storms at Hobart and comparisons with IRI model predictions", *J. Sci. Res. Dev.*, 14, 98-105, 2013.
- [20] S. Kumar, E. L. Tan, and D. S. Murti, "Impacts of solar activity on performance of the IRI-2012 model predictions from low to mid latitudes", *Earth, Planets and Space*, 67, 42-59, 2015.
- [21] P. P. Chaitanya, A. K. Patra, N. Balan, and S. V. B. Rao, "Ionospheric variations over Indian low latitudes close to the equator and comparison with IRI-2012", *Ann. Geophys.*, 33, 997-1006, 2015.
- [22] Space Physics Interactive Data Resource, "SPIDR", <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>.
- [23] Space Physics Data Facility, "SPDF", <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri201vitmo.html>.