

KUZEY YARIMKÜREDEKİ YÜKSEK ENLEM foF2 DEĞERLERİNDEKİ DEĞİŞİMLERİN JEOMANYETİK AKTİVİTEYE BAĞLILIĞI

Kerime AKSAÇ¹, İbrahim ÜNAL^{2,*}, Erdiñç TİMOÇİN³

¹ Fizik Bölümü, Fen Edebiyat Fakültesi, İnönü Üniversitesi, 44280, Malatya, Türkiye

² Fen Bilgisi Eğitimi Bölümü, Eğitim Fakültesi, İnönü Üniversitesi, 44280, Malatya, Türkiye

³ Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Mersin Üniversitesi, 33343, Mersin, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, Aralık 1971-Eylül 1972 tarihleri arasında yüksek enlem bölgesi olarak tanımlanan 60°-90° değişmeyen manyetik enlem arasındaki 7 iyonsonda istasyonundan alınan saatlik foF2 verilerinin değişmeyen manyetik enleme göre değişimleri, farklı jeomanyetik aktivite durumları için incelenmiştir. Analizlerden elde edilen sonuçlara göre, gündüz saatlerindeki foF2 değerlerinin, gece saatlerindeki değerlerden büyük olduğu, ayrıca bu saatlerde foF2 değerlerinin değişmeyen manyetik enlem artışı ile 68°-72° değişmeyen manyetik enlemleri arasındaki artış dışında azaldığı tespit edilmiştir. Gece saatlerinde ise foF2 değerlerinin yaklaşık 66°-72° değişmeyen manyetik enlemleri arasında arttığı, bu enlemlerden daha büyük ve daha küçük enlemlerde ise foF2 değerlerinin azalarak çukura benzer bir yapı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca mevsimsel ve jeomanyetik aktivite değişimlerinin, foF2 değerlerinin enlemsel değişimleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Jeomanyetik pasif durumdaki foF2 değerleri, jeomanyetik aktif durumdaki foF2 değerlerinden büyüktür. Özellikle jeomanyetik aktif durumdaki Aralık döneminde, polar cap ve polar oval bölgeleri daha belirgin ve bu bölgeler enlemsel olarak daha geniş bir yapıya sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek enlem iyonosferi, Manyetosfer, Polar bölge, Jeomanyetik aktivite, Kritik frekans

THE DEPENDENCE ON THE GEOMAGNETIC ACTIVITY OF CHANGES IN THE foF2 VALUES AT THE HIGH LATITUDES IN THE NORTHERN HEMISPHERE

ABSTRACT

In this study, changes according to invariant magnetic latitude of the hourly foF2 data that are taken from seven ionosondes stations are situated at between 60°-90° invariant magnetic latitude as known high latitude region are investigated for different geomagnetic activity conditions during December 1971-September 1972. According to the results obtained from the analyses, it was found that the foF2 values in the daytime are larger than those in the nighttime, and while the foF2 values in these hours increase between about 68° and 72° invariant magnetic latitude, the foF2 values in larger and lower latitudes than these latitudes decrease with increasing magnetic latitude. At night time, it was observed that the foF2 values increases between about 66° and 72° invariant magnetic latitude, while the foF2 values exhibit a trough structure at larger and smaller latitudes than these latitudes. It is also observed that seasonal and geomagnetic activity changes have a significant influence on the latitudinal changes of the foF2 values. The foF2 values in the geomagnetic quiet condition are larger than the foF2 values in the geomagnetic active conduction. Especially in the geomagnetic active conduction of the December, the polar cap and polar oval zones are more prominent and have a larger latitudinal structure.

Keywords: High latitude ionosphere, Magnetosphere, Polar region, Geomagnetic activity, Critical frequency

1. GİRİŞ

İyonosfer, yüksek frekans bandındaki radyo dalgalarını uzak mesafelere kadar yansıtabilen atmosferin önemli bir bölgesidir. İyonosferden yansıyan dalgalarla yapılan haberleşmenin sağlıklı olarak yapılabilmesi için; iyonlaşmanın ve kimyasal süreçlerin, elektron yoğunluğunun enlemsel ve gece-gündüz değişimlerinin ve dolayısıyla iyonosferin hangi parametrelere karşı nasıl değiştiğinin ortaya konulması gerekmektedir [1-2].

İyonosferin farklı enlemlerindeki elektron yoğunluğu incelendiğinde, enlemsel olarak büyük değişiklikler gösterdiği anlaşılmıştır. Bu değişikliklere farklı fiziksel süreçlerin neden olduğu görülmüştür. Bu nedenle iyonosfer, coğrafik olarak düşük, orta ve yüksek enlem iyonosferi şeklinde üç farklı enlem bölgesine ayrılarak incelenmektedir [3, 4].

Özellikle yüksek enlem iyonosferindeki iyonlaşmada, Güneş ışınlarının iyonlaştırma etkisinin yanında manyetosferik etki de çok önem taşımaktadır. Bu manyetosferik etkileşim sonucunda meydana gelen, elektrik alanlar, parçacık yağışı, alan boyunca akımlar, ısı akışı ve sürtünme gibi atmosferik süreçler, yüksek enlemlerdeki üst atmosfer-alt atmosfer sistemini güçlü bir şekilde birbirine bağlamaktadır [5].

Yüksek enlem iyonosferindeki büyük ölçekli hareketlerin sebebi manyetosferik kökenli elektrik alanlar olup, bu da elektron yoğunluğu yapısını etkiler [6]. Aynı zamanda auroral ovaldeki parçacık yağışı, iyon-elektron yoğunluklarını ve sıcaklıklarını etkilemesiyle, iyonlaşma oranlarının artmasına ve elektron sıcaklıklarının yükselmesine sebep olur. Özellikle jeomanyetik aktif koşullar altında meydana gelen iyonosferik ve termosferik bu değişimler, yüksek enlem manyetosferine enerji girişinin daha fazla olmasından kaynaklı olarak daha etkili ve daha karmaşıktır. Bu fiziksel süreçlere bağlı olarak yüksek enlem bölgesindeki elektron yoğunluklarında ani ve tahmin edilmez büyük değişimler meydana gelmektedir [5-8]. Jeomanyetik aktiviteye bağlı olarak elektron yoğunluğunda meydana gelen bu değişimler, orta ve düşük enlemlere göre yüksek enlem bölgesindeki yüksek frekanslı haberleşmelerde daha farklı bir etki meydana getirmektedir [9-14]. Bundan dolayı, yüksek enlemlerdeki iyonosferik parametreler üzerine jeomanyetik aktivite değişimlerinin etkilerini anlamak oldukça önem taşımaktadır [15, 16].

Bu çalışmada genel olarak, ekinoks (21 Mart, 23 Eylül) ve gündönümü (21 Haziran, 21 Aralık) için yüksek enlem bölgesindeki elektron yoğunluğu değerlerindeki değişimlerin jeomanyetik aktiviteye bağlılığı incelenmiştir. Bunun için, coğrafik 40°-100° batı boylamları ile 60°-90° kuzey enlemlerindeki (yüksek enlem bölgesi) 7 iyonsonda istasyonundan ölçülen F2 tepesi elektron yoğunluğunun bir ölçüsü olan iyonosferik kritik frekans (foF2) verileri, değişmeyen manyetik enlemin (Λ) bir fonksiyonu olarak incelenmiştir. Böylece, foF2 verilerini kullanarak yüksek enlem bölgesinde manyetosfer ve iyonosfer arasındaki etkileşim, günlük, mevsimsel ve farklı jeomanyetik aktivite koşulları için tanımlanmaya çalışılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, yüksek enlem bölgesindeki manyetosferik süreçlerin iyonosfer üzerindeki etkisini incelemek için 60°-90° Λ arasında bulunan 7 iyonsonda istasyonundan Aralık 1971-Eylül 1972 tarihleri arasında alınmış saatlik foF2 verileri kullanılmıştır. Kullanılan istasyonların adları, coğrafik ve manyetik enlem-boylam değerleri Tablo 1’de verilmiştir.

Ayrıca manyetik aktivite değişimlerinin foF2 üzerindeki etkisini incelemek için foF2 verilerinin alındığı aynı zaman dilimlerindeki küresel manyetik aktivite durumunu veren 3 saatlik K_p verileri ile auroral elektrojet indisi olan saatlik AE verileri kullanılmıştır. Saatlik foF2 verileri ve 3 saatlik K_p verileri, uzay fiziği etkileşim veri kaynağı (Space Physics Interactive Data Resource) merkezinden

elde edilmiştir. Saatlik AE verileri, jeomanyetik auroral elektrojet (AE) indisi sayfası (Geomagnetic Auroral Electrojet (AE) Index Home Page) veri servisinden alınmıştır.

Tablo 1. İyonsonda istasyonların enlem ve boylam değerleri

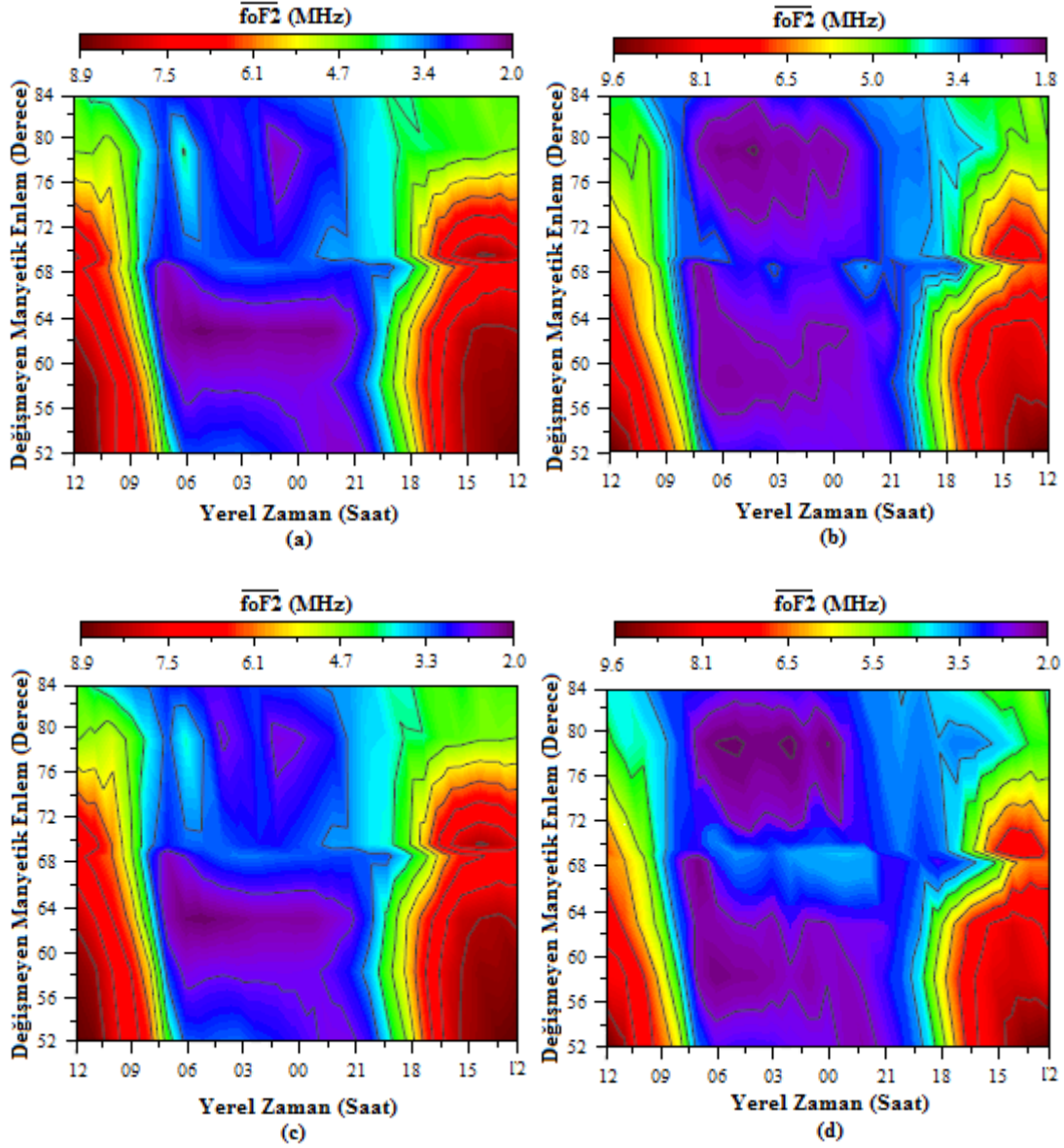
İstasyon Adı	Coğrafi Enlem	Coğrafi Boylam	Değişmeyen Manyetik Enlem
Boulder	40,0° K	254,7° D	52,5° K
Ottawa	45,4° K	284,1° D	58,7° K
Winnipeg	49,8° K	295,6° D	63,4° K
Narssarsuaq	61,2° K	314,6° D	69,0° K
Churchill	58,8° K	265,8° D	70,0° K
Godhavn	69,3° K	306,5° D	79,5° K
Resolute Bay	74,7° K	265,1° D	84,3° K

Yüksek enlem iyonosferik foF2 değerlerinin değişmeyen manyetik enleme göre değişimini, saatlere, mevsimlere ve farklı manyetik aktivite durumlarına göre inceleyebilmek için;

- Belirlenen tarihler için saatlik foF2 verileri, 3 saatlik K_p verileri ve saatlik AE verileri, uzay fiziği etkileşimli veri merkezlerinden alınmıştır.
- Doğrusal ara değer bulma (linear interpolation) yöntemi kullanılarak 3 saatlik K_p değerlerinden saatlik K_p değerleri hesaplanmıştır. Böylece manyetik aktivitenin foF2 üzerindeki etkisi her bir evrensel zaman için incelenebilmiştir.
- Mevsimsel değişimlerin etkisini görebilmek için, saatlik foF2, K_p ve AE verileri, ekinoks (21 Mart, 23 Eylül) ve gündönümü (21 Haziran, 21 Aralık) tarihlerinin 42 gün öncesini ve 42 gün sonrasını kapsayan toplam 84 günlük 4 döneme ayrılmıştır [17].
- Mevsimlere ayrılan foF2 verileri, manyetik sakin ($K_p \leq 2^+$, $AE \leq 200$) ve manyetik aktif ($K_p > 2^+$, $AE > 200$) saatlere göre yeniden sınıflandırılmıştır. Böylece manyetik aktivite değişimlerinin foF2 üzerindeki etkisi incelenebilmiştir [17, 18].
- Her bir mevsim için her bir jeomanyetik aktivite ($K_p \leq 2^+$, $K_p > 2^+$, $AE \leq 200$, $AE > 200$) durumuna göre sınıflandırılmış foF2 verilerinin saatlik ortalama değerleri hesaplanmıştır.
- Evrensel zamana göre alınan ve analizi yapılan kritik frekans ve jeomanyetik indis verileri, yerel zamana (YZ) göre yeniden düzenlenmiştir.
- Tüm yerel zamanlardaki foF2 değerlerinin farklı jeomanyetik aktivite durumlarda enlemsel davranışını görmek için, ortalama foF2 değerlerinin yerel zamana ve değişmeyen manyetik enleme göre eşyüzey eğrileri çizdirilmiştir. Böylece manyetik aktivite değişiminin foF2 üzerindeki etkisi, enlemsel olarak tespit edilmeye çalışılmıştır.

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

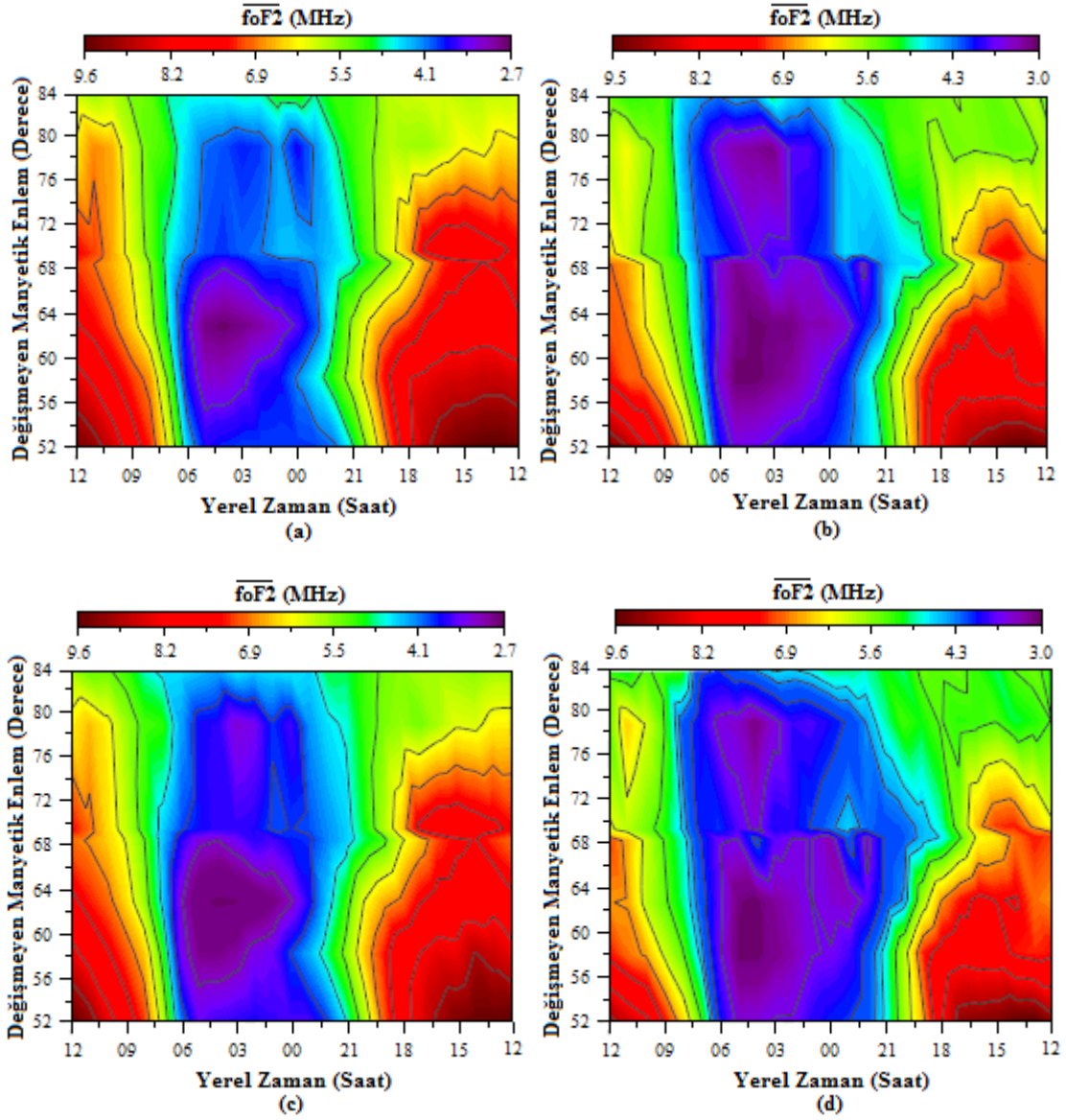
Şekil 1-4, 21 Aralık 1971-23 Eylül 1972 tarihleri arasında K_p ve AE indisleri göz önüne alınarak, pasif ve aktif durumdaki ortalama foF2 değerlerinin 24 saat için değişmeyen manyetik enleme göre değişimlerini göstermektedir.



Şekil 1. 1971 yılı 21 Aralık dönemi için 24 saat boyunca hesaplanmış ortalama foF2 değerlerinin değişmeyen manyetik enleme göre değişimi: (a) $K_p \leq 2^+$ için, (b) $K_p > 2^+$ için, (c) $AE \leq 200$ için, (d) $AE > 200$ için

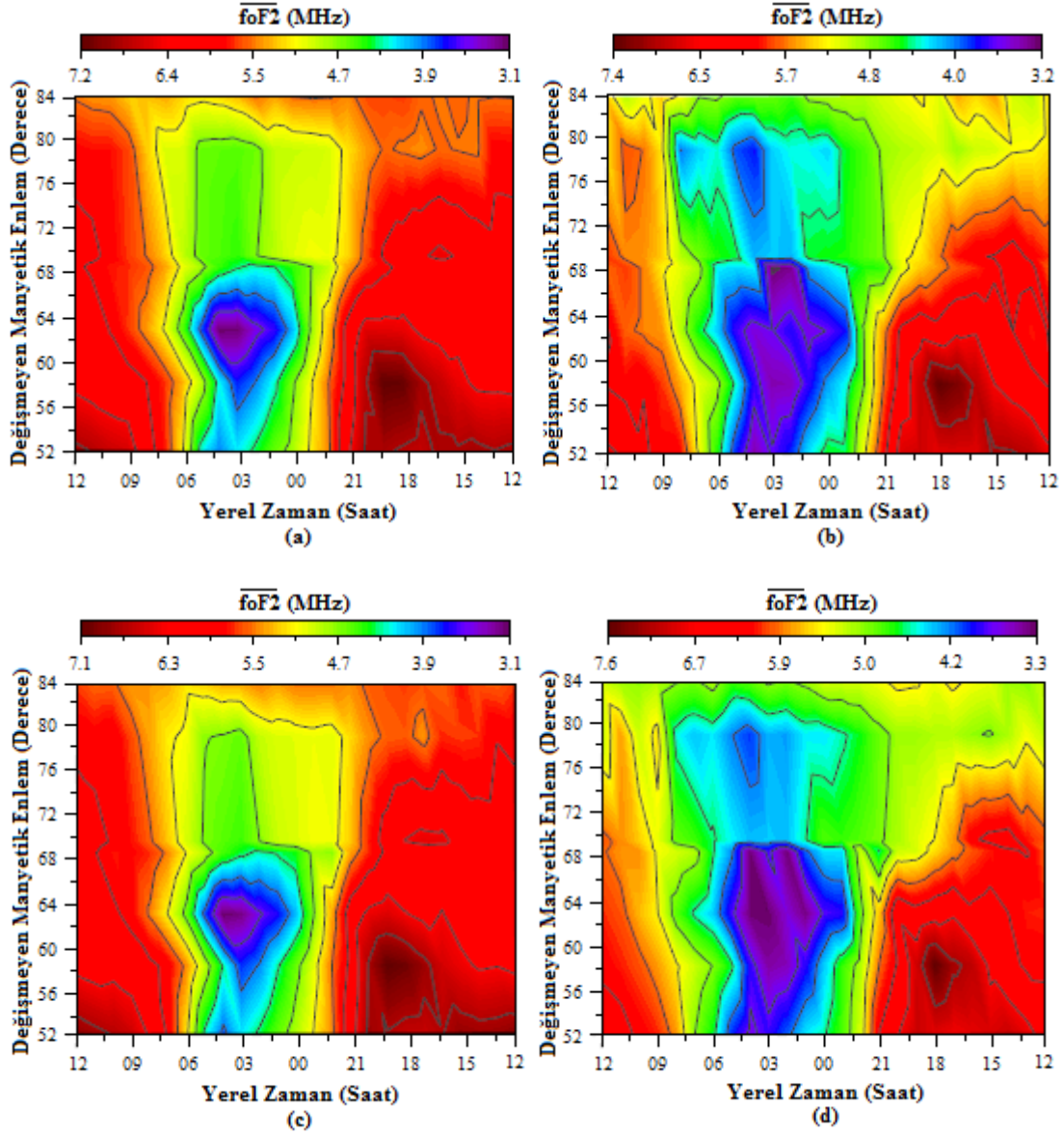
Şekil 1 incelendiğinde, Aralık dönemi boyunca her iki jeomanyetik aktivite indisi için, gündüz saatlerinde aktif ve pasif durumlardaki foF2 değerleri manyetik enlem artışı ile genel olarak azalma eğilimi gösterirken, yaklaşık 68° - 72° manyetik enlemleri arasında foF2 değerlerindeki artış dikkat çekmektedir. Bu artma, aktif durumlarda daha net bir şekilde görülmektedir. Gece saatlerinde ise, pasif durumlar için yaklaşık 66° - 72° manyetik enlemleri arasında foF2 değerleri artmaktadır. Bu artma, aktif durumlarda özellikle AE indisine bağlı değişimlerde daha iyi görülmektedir ve artmanın görüldüğü enlem bölgesi genişlemektedir. Ayrıca, bu enlemlerden daha düşük enlem ve daha büyük

enlem değerlerinde foF2 değerleri çukura benzer bir yapıya sahiptir. Bu çukurlar, kış mevsiminde diğer mevsimlere göre daha belirgin hale gelmiştir.



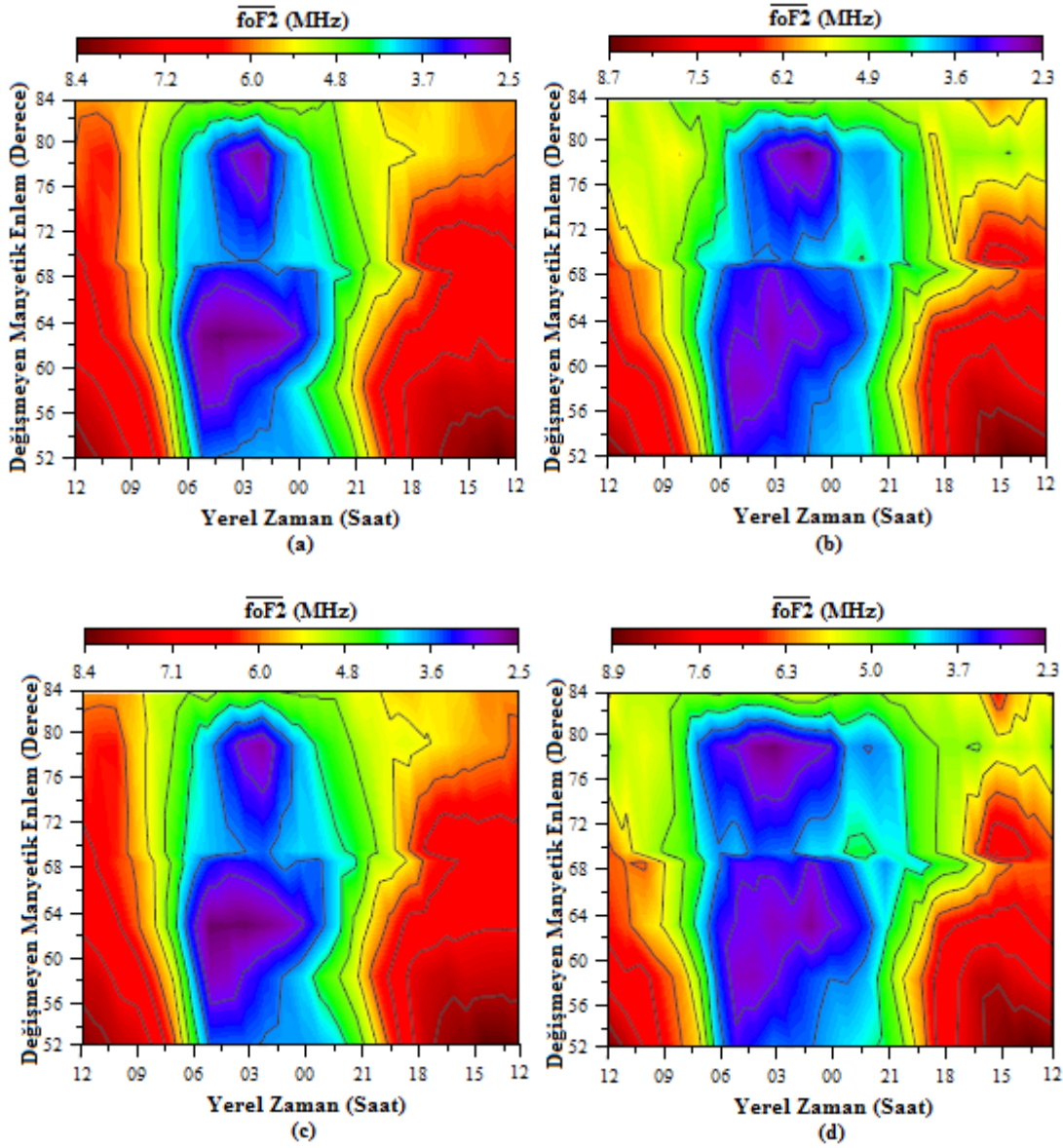
Şekil 2. 1972 yılı 21 Mart dönemi için 24 saat boyunca hesaplanmış ortalama foF2 değerlerinin değişmeyen manyetik enleme göre değişimi: (a) $K_p \leq 2^+$ için, (b) $K_p > 2^+$ için, (c) $AE \leq 200$ için, (d) $AE > 200$ için

Şekil 2’de görüldüğü gibi, K_p ve AE indislerinin her ikisi içinde genel olarak gündüz saatlerindeki foF2 değerleri, gece saatlerindeki foF2 değerlerinden ve pasif durumdaki foF2 değerleri, aktif durumdaki foF2 değerlerinden daha büyüktür. Ayrıca hem aktif hem de pasif durumlar için manyetik enlem arttıkça gündüz saatlerinde foF2 değerlerinde azalma görülürken, yaklaşık 69° ile 70° manyetik enlem arasında foF2 değerlerindeki artış dikkat çekmektedir. Gece saatlerinde ise, aktif ve pasif durumlar için yaklaşık 69° - 70° manyetik enlemleri arasındaki foF2 değerleri artmıştır. Bu enlemlerden daha düşük enlem ve daha büyük enlem değerlerindeki foF2 değerleri ise çukura benzer bir yapıya sahiptirler.



Şekil 3. 1972 yılı 21 Haziran dönemi için 24 saat boyunca hesaplanmış ortalama foF2 değerlerinin değişmeyen manyetik enleme göre değişimi: (a) $K_p \leq 2^+$ için, (b) $K_p > 2^+$ için, (c) $AE \leq 200$ için, (d) $AE > 200$ için

Şekil 3'te görüldüğü gibi, her iki jeomanyetik aktivite indisi içinde gündüz saatlerinde aktif ve pasif durumlar için foF2 değerleri, manyetik enlem artışına karşı genel olarak azalma eğilimindedir. Gece saatlerinde ise, foF2 değerleri pasif durumlar için yaklaşık 62° manyetik enlemden sonra artarken, aktif durumlar için ise sadece yaklaşık 68° - 72° manyetik enlemleri arasında artmıştır. Bu enlemlerden daha düşük enlem ve daha büyük enlemlerde foF2 değerleri Mart dönemine benzer şekilde çukura benzer bir yapıya sahiptirler. Ancak gece saatleri için oluşan bu çukursal yapıların Mart dönemine göre daha az belirgin olduğu görülmektedir.



Şekil 4. 1972 yılı 23 Eylül dönemi için 24 saat boyunca hesaplanmış ortalama foF2 değerlerinin değişmeyen manyetik enleme göre değişimi: (a) $K_p \leq 2^+$ için, (b) $K_p > 2^+$ için, (c) $AE \leq 200$ için, (d) $AE > 200$ için

Şekil 4 incelendiğinde, Mart dönemine benzer şekilde her iki jeomanyetik aktivite indisi için gündüz saatleri için pasif durumlardaki foF2 değerleri, manyetik enlem arttıkça azalırken, aktif durumlarda yaklaşık 68°-72° manyetik enlemleri arasındaki foF2 değerleri artışı dikkat çekmektedir. Gece saatlerinde ise, aktif ve pasif durumlarda yaklaşık 68°-72° manyetik enlemleri arasında foF2 değerleri artmaktadır. Bu enlemlerden daha düşük enlem ve daha büyük enlem değerlerinde foF2 değerleri çukura benzer bir yapıya sahiptirler.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, yüksek enlem bölgesindeki foF2 değerlerinin, jeomanyetik aktivite değişimlerine, günlük ve mevsimsel değişimlere bağlı olarak enlemsel değişimleri incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Gündüz saatlerindeki foF2 değerlerinin, gece saatlerindeki foF2 değerlerinden büyük olduğu görülmüştür. Bu durum, Güneş'in gündüz saatlerindeki iyonlaştırıcı etkisinin daha büyük olmasından kaynaklanmaktadır [1, 3-5].
- Gündüz saatleri için, manyetik enlem arttıkça foF2 değerlerinin azaldığı görülmüştür. Bu durumun, yüksek enlem bölgelerinde Güneş ışınlarının iyonlaştırıcı etkisindeki azalmaya bağlı olarak iyonosferin elektron yoğunluğunda meydana gelen azalma ile ilişkilidir [19, 20]. Ancak yaklaşık 68°-72° manyetik enlemleri arasında foF2 değerlerindeki artış bu bölgenin parçacık yağışına bağlı olarak polar oval olarak adlandırılan bölge içinde bulunmasından kaynaklanmaktadır [3, 4, 21, 22].
- Gece saatleri için, foF2 değerleri yaklaşık 69°-70° manyetik enlemleri arasında artmaktadır. Bu durum, 69°-70° manyetik enlemlerinin parçacık yağışının yoğun ve elektrik alan şiddetinin büyük olduğu polar oval bölgesi içinde yer almasından kaynaklanmaktadır [3, 4, 23, 24]. Ancak bu enlemlerden daha büyük ve daha küçük enlemlerde foF2 değerleri çukura benzer yapıya sahiptir. Polar ovalden daha düşük enlemlerde tespit edilen çukura benzer yapıların orta enlem elektron yoğunluğu çukuru olarak bilinen bölgede, polar ovalden daha büyük enlemlerde tespit edilen çukura benzer yapıların ise elektrik alan şiddetinin daha az olduğu polar cap bölgesi içinde olmasından kaynaklanmaktadır [17, 25].
- Jeomanyetik pasif durumdaki ortalama foF2 değerlerinin, jeomanyetik aktif durumdaki ortalama foF2 değerlerinden büyük olduğu görülmüştür. Bu durum termosferik rüzgârlarla ilişkilidir. Jeomanyetik aktif zamanlarda kutup bölgelerine giriş yapan yüksek enerjili parçacıklardan kaynaklı ısı artışı, bu bölgede termosferik rüzgârlar meydana getirmektedir. Termosferik rüzgârlar manyetik alan çizgileri boyunca orta ve düşük enlemlere doğru yayıldıklarından dolayı bu bölgelerdeki F tabakasının iyon kimyasını değiştirerek elektron yoğunluğunda ani artmaların ve azalmaların meydana gelmesine sebep olur. Buna bağlı olarak yüksek enlemlerde jeomanyetik aktif durumda tespit edilen foF2 ve elektron yoğunluğu değerleri, jeomanyetik pasif durumdaki değerlerden daha küçüktür [26, 27].
- Jeomanyetik aktif durumlarda polar oval ve polar cap bölgeleri daha belirgin ve enlemsel olarak daha genişlemiş görülmektedir. Bu jeomanyetik aktivitenin artması ile polar oval bölgesindeki parçacık yağışının yoğun olması ile ilişkilidir [3, 4].
- Ortalama foF2 değerlerinin değişmeyen manyetik enleme göre değişimleri incelendiğinde, çukura benzer yapıların tüm mevsimler ve tüm jeomanyetik aktivite durumları için yalnızca gece saatlerinde meydana geldiği görülmektedir. Özellikle Aralık döneminde meydana gelen bu yapıların daha belirgin ve daha derin olarak görüldüğü tespit edilmiştir. Bu durumun, Aralık döneminde polar cap içerisindeki plazma sürüklenme hızının yavaşlamasına bağlı olarak iyonosferik özelliklerin değişmesi ile ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Aralık döneminde, plazma sürüklenme hızının azalması ve Güneş ışınlarının geliş açısına bağlı olarak iyonlaşmanın azalması, polar cap içindeki polar boşluk (polar hole) olarak bilinen çukursal yapıyı oluşturmaktadır [3]. Aralık döneminde ortaya çıkan diğer bir ilginç özellik ise orta enlem elektron yoğunluğu çukurunun belirgin hale gelmesidir. Gece saatlerinde polar ovalin ekvator tarafındaki bu çukur enlemsel olarak dar ve boylamsal olarak uzanmış düşük elektron yoğunluklu bir bölgedir [17, 25].

KAYNAKLAR

- [1] Rishbeth H, Garriott OK. Introduction to Ionospheric Physics. New York, USA: Academic Press, 1969.
- [2] Banks M, Kockarts G. Aeronomy Part A. New York, USA: Academic Press, 1973.
- [3] Rishbeth H. Physics and chemistry of the ionosphere. Contemp Physics 1973; 14: 229-249.
- [4] Kelley MC. The Earth's Ionosphere (Plasma Physics and Electrodynamics). New York, USA: Academic Press, 1989.
- [5] Schunk RW, Nagy AF. Ionospheres. New York, USA: Cambridge University Press, 2000.
- [6] Prölss GW. Physics of the Earth's Space Environment. Berlin-Heidelberg-New York, DE, USA: Springer-Verlag Press, 2004.
- [7] Kivelson MG, Russell CT. Introduction to Space Physics. New York, USA: Cambridge University Press, 1995.
- [8] Tascione TF. Introduction to the Space Enviroment. Florida, USA: Orbit Book Company, 1988.
- [9] Ezquer RG, Cabrera MA, Lo'pez JL, Alborno MR, Mosert M, Marco P, Buresova D. Critical frequency and maximum electron density foF2 region over four stations in the north american sector. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 2011; 73: 420-429.
- [10] Maltseva OA, Mozhaeva NS, Nikitenko TV. Comparison of model and experimental ionospheric parameters at high latitudes. Advances in Space Research 2013; 51: 599-609.
- [11] Atukkar R, Bhardwaj S, Khatarkar P, Bhawre P. Geomagnetic disturbances and its impact on ionospheric critical frequency (fof2) at high, mid and low latitude region. American Journal of Astronomy and Astrophysics 2014; 2(6): 61-65.
- [12] Khatarkar P, Purohit PK, Gwal AK. Study of ionospheric f2 layer characteristics at low, mid and high latitudes. International Journal of Science and Research 2014; 3: 1509-1513.
- [13] Atulkar R, Bhardwaj S, Khatarkar P, Bhawre P, Purohit PK. Geomagnetic disturbances and its impact on ionospheric critical frequency (foF2) at high, mid and low latitude region. American Journal of Astronomy and Astrophysics 2014; 2(6): 61-65.
- [14] Deminov MG, Deminova GF. Geomagnetic activity that corresponds to the median of the F2-layer critical frequency at various latitudes. Geomagnetizm and Aeronomy 2016; 56: 572-576.
- [15] Das AC, Rajaram G, Rastogi RG. Effects on foF2 of daytime and nighttime sudden commencement storms. J Geomagnetic Geoelectric 1973; 25: 349-362.
- [16] Yadav R, Gwal AK. Comparative study of high and mid latitude foF2 during low solar activity, International Journal of Innovative Research in Science. Engineering and Technology 2016; 5: 289-293.
- [17] Tulunay YK, Sayers J. Characteristics of mid-latitude trough as determined by the electron density experiments on Ariel-3. J Atmosph Terr Phys 1971; 33: 1737-1761.

- [18] Chen GX, Xu WY, Wei ZG, Ahn BH, Kamide Y. Auroral Electrojet Oval. *Earth Planets Space* 2003; 55: 255-216.
- [19] Feichter E, Leitinger R. A 22-year cycle in the F layer ionization of the ionosphere. *Ann Geophys* 1977; 15: 1015-1027.
- [20] Hao YQ, Shi H, Xiao Z, Zhang DH. Weak ionization of the global ionosphere in solar cycle 24. *Ann Geophys* 2014; 32: 809-816.
- [21] Carbary JF. A Kp-based model of auroral boundaries. *Space Weather* 2005; 3: doi:10.1029/2005SW000162.
- [22] Xiong C, Lüh H, Wang H, Johnsen MG. Determining the boundaries of the auroral oval from CHAMP field-aligned current signatures-Part 1. *Ann Geophys* 2014; 32: 609–622.
- [23] Kamide Y, Rostoker G. The spatial relationship of field-aligned currents and auroral electrojets to the distribution of nightside auroras. *Journal of Geophysical Research* 1977; 82: 5589–5608.
- [24] Kamide Y. The relationship between field-aligned currents and the auroral electrojets. *Space Science Reviews* 1982; 31: 127-243.
- [25] Tulunay YK. Global electron density distributions from the Ariel 4 satellite at mid-latitudes during quiet magnetic periods. *J Atmosph Terr Phys* 1973; 35: 233-254.
- [26] Rishbeth H. F-region storms and thermospheric circulation. *J Atmos Terr Phys* 1975; 37: 1055-1064.
- [27] Hernandez G, Roble RG. Observations of large scale thermospheric waves during geomagnetic storms. *J Geophys Res* 1978; 83: 5531-5538.