



Kasım 2021'de Gözlemlenen Jeomanyetik Fırtına ve Düzce Depreminin Jeomanyetik Alan Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

Investigation of the Effects of the Geomagnetic Storm and the Düzce Earthquake Observed in November 2021 on the Geomagnetic Field

Erdinç Timoçin^{1*}, Hüseyin Temuçin², Oya Ankaya Pamukçu³

¹ Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Mersin, TÜRKİYE

² Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Ankara, TÜRKİYE

³ Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author*: erdinctimocin@mersin.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 25.05.2022

Kabul Tarihi / Accepted: 18.08.2022

Araştırma Makalesi/Research Article

DOI:10.21205/deufmd.2023257319

Atıf şekli/How to cite: TİMOÇİN, E., TEMUÇİN, H., ANKAYA PAMUKÇU, O. (2023). Kasım 2021'de Gözlemlenen Jeomanyetik Fırtına ve Düzce Depreminin Jeomanyetik Alan Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması. DEÜ FMD 25(73), 239-253.

Öz

Bu çalışmada, depremlerin jeomanyetik alan verileri ile ilişkisi incelenmiştir. Öncelikle konu kapsamında deneysel çalışma olarak 3-4 Kasım 2021 boyunca meydana gelen jeomanyetik fırtınanın etkileri, çalışmanın ikinci aşamasında ise 17 Kasım 2021 Düzce depreminin (M=4,8) jeomanyetik alanlar üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bunun için gözlem (IZN) ve referans (PEG ve PAG) manyetometre istasyonlarında ölçülmüş jeomanyetik alanın X, Y ve Z bileşenlerinin verileri kullanılmıştır. Bu bileşenlerin zamansal çözünürlüğü 60 saniyedir. Ayrıca, jeomanyetik aktivite göstergesi olarak küresel jeomanyetik aktivite indisi (K_p) verileri kullanılmıştır. İlk önce Jeomanyetik fırtınadan ve depremden kaynaklı jeomanyetik anomalileri tespit etmek için istasyonlardaki jeomanyetik alan bileşenlerinin (X, Y, Z) jeomanyetik alan değişim oranı (ROG) ve jeomanyetik alan değişim oranı indeksi (ROGI) hesaplanmıştır. Daha sonra X, Y ve Z bileşenlerinin günlük değişimleri arasındaki ilişkiyi istatistiksel olarak tespit etmek için ROGI(X, Y, Z) değerlerini kullanarak istasyon çiftlerinin (IZN-PEG, PEG-PAG ve IZN-PAG) korelasyon katsayıları (r) hesaplanmıştır. X, Y ve Z için gözlem ve referans manyetometre istasyonlarından elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Jeomanyetik fırtına boyunca IZN, PEG ve PAG için hesaplanan ROGI(X), ROGI(Y) ve ROGI(Z) değerlerinin çok benzer bir günlük değişime sahip oldukları tespit edilmiştir. 17 Kasım 2021 boyunca PEG ve PAG istasyonlarının ROGI(Y) değerleri birbirleriyle uyumlu bir günlük değişime sahipken, 08:15 EZ (Evrensel Zaman) ile 10:10 EZ arasında IZN istasyonunun ROGI(Y) değerlerinde bir artış (anomali) tespit edilmiştir. Bu sonuçlardan, IZN için tespit edilen anomalinin 17 Kasım Düzce depremi ile olası ilişkili sismomanyetik kaynaklı bölgesel öncül bir jeomanyetik anomali olarak değerlendirilebileceği öngörülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Manyetometre, Jeomanyetik Alan, Deprem, Jeomanyetik Anomali

Abstract

In this study, the relationship between earthquakes and geomagnetic field data was investigated. As an experimental study, firstly, the effects of the geomagnetic storm that occurred during 3-4 November 2021, and in the second stage of the study, the effects of the 17 November 2021 Düzce earthquake ($M=4,8$) on geomagnetic fields were investigated. For this, data of X, Y and Z components of geomagnetic field measured at observation (IZN) and reference (PEG and PAG) magnetometer stations were used. The temporal resolution of these components is 60 seconds. In order to detect geomagnetic anomalies caused by geomagnetic storm and earthquake, firstly, geomagnetic field change rate (ROG) and geomagnetic field change rate index (ROGI) were calculated for geomagnetic field components (X, Y, Z) of each station. Then, correlation coefficients (r) of station pairs (IZN-PEG, PEG-PAG and IZN-PAG) were calculated using ROGI(X, Y, Z) values in order to statistically determine the relationship between daily changes of X, Y and Z components. The results obtained from the observation and reference magnetometer stations for X, Y, Z were compared with each other. It was determined that ROGI(X), ROGI(Y) and ROGI(Z) values calculated for IZN, PEG and PAG have a very similar daily variation during the geomagnetic storm. During 17 November 2021, ROGI(Y) values of PEG and PAG stations have a compatible daily variation with each other while the ROGI(Y) values of IZN station have an increase (anomaly) between 08:15 UT (Universal Time) and 10:10 UT. From these results, it is predicted that the anomaly detected for IZN can be evaluated as a regional premise geomagnetic anomaly with seismomagnetic origin possibly related to the 17 November Düzce earthquake.

Keywords: Magnetometer, Geomagnetic Field, Earthquake, Geomagnetic Anomaly

1. Giriş

Depremlerden önce jeomanyetik alan verilerindeki bozulmalar ilk olarak 27 Mart 1964'te meydana gelen Alaska depremi için tespit edilmiştir [1]. Deprem büyüklüğü ile anomalinin tespit edildiği istasyonunun deprem merkez üssünden uzaklığı arasındaki ilişki araştırılmış ve ilk kez sismojenik olduğuna inanılan sismik anomaliler kullanılarak, deprem büyüklüğü ile anomalinin tespit edildiği istasyonunun deprem merkez üssünden uzaklığı arasında deneysel bir ilişki elde edilmiştir [2].

Deneysel çalışmalarda, magmatik bir kayanın yumuşak bileşeninin manyetik yoğunluğunun sıkıştırmanın artmasıyla azaldığı, sert bileşeninin manyetik yoğunluğunun sıkıştırma manyetizasyona dik olduğunda artarken, sıkıştırma manyetizasyona paralel olduğunda azaldığı ve böylece sıkıştırılmış bir kayanın manyetik duyarlılığının anizotropik hale geldiği tespit edilmiştir [3, 4]. Çok kristalli manyetit ve kaya numuneleri, bir manyetik genişlemenin gözlemlenip gözlemlenmeyeceğini görmek için izotermal sıkıştırma maruz bırakılmıştır. Gerilmeler boyunca manyetizasyon-gerilme eğrilerinin eğimlerinde anormal değişiklikler tespit edilmiştir [5]. Yer kabuğunun koşullarına karşılık gelen stres altındaki kayaların manyetik

anizotropisinin laboratuvar modellemesi, 4150 m ile 8080 m arasındaki derinliklerden alınan bir dizi numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ağırlıklı olarak manyetit içeren numunelerin, gerilme koşullarına karşılık gelen basınçlar altında önemli ölçüde kararsız manyetik anizotropi sergilediği bulunmuştur [6].

Manyetik alan ölçümü yapan cihazların teknolojisindeki gelişme ile birlikte daha hassas manyetik alan ölçümlerinin yapılması ve manyetometre cihazlarının küresel ölçekte yaygınlaşması, depremler ile jeomanyetik anomaliler arasındaki ilişkiyi araştıran çalışmaların sayısının her geçen yıl artmasına sebep olmuştur. Abruzzi bölgesinde (Orta İtalya) 1989-1992 boyunca sismo manyetik ağdan ölçülen jeomanyetik yoğunluk verileri 5 istasyonda eş zamanlı olarak kaydedilmiş ve veriler karşılaştırılmıştır. Şebekenin doğu tarafında bulunan iki istasyonda jeomanyetik alanın mutlak seviyesinde yaklaşık 10 nT'lik bir değişim tespit edilmiştir. Tespit edilen manyetik anomalinin bu süre zarfında kabuk stresindeki asismik değişikliklerden kaynaklanabileceği önerilmiştir [7, 8]. Depremlerin kısa vadeli tahminlerinde en umut verici parametrelerden biri olan Ultra Düşük Frekans (UDF) jeomanyetik değişimleri ile ilgili en son sonuçlar sunulmuştur [9]. Tayvan'da 1988-2001 döneminde jeomanyetik anomalilerle ilişkili

olduğu yorumlanan 38 depremi incelemek için hibrit sistem kullanılmıştır. Depremlerle ilişkili jeomanyetik anomalilerin fay boyunca ve kuşak bölgesinde toplandığı tespit edilmiştir [10]. 19 Aralık 2009'da Tayvan'da meydana gelen Mw=6,4 depremi için manyetik alan verileri incelenmiştir ve deprem üssüne yakın Hualien (HLN) istasyonunun jeomanyetik alanları üzerinde ~10-15 nT'lik anormal varyasyonların depremden yaklaşık bir hafta önce başladığı ve yaklaşık iki hafta sürdüğü tespit edilmiştir [11]. Japonya'da 11 Mart 2011 tarihinde meydana gelen 9,0 Mw büyüklüğündeki depremin jeomanyetik etkisini incelemek için MAGDAS ve Japonya Jeo-Uzamsal Bilgi Kurumu ağlarından gelen jeomanyetik veriler analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından, diğer referans istasyonları ile karşılaştırıldığında depremin merkez üssü civarındaki toplam jeomanyetik alan yoğunluğunda yaklaşık 5 nT'lik bir artış olduğu tespit edilmiştir [12]. Şili'deki üç ana depreme yakın dikey manyetik davranış analiz edilmiştir. Her depremden 1 ay önce milihertz aralığındaki güç spektral yoğunluğunda artışların olduğu ve deprem meydana geldikten birkaç ay sonra güç spektral yoğunluğunun daha düşük değerlere düştüğü gözlemlenmiştir [13]. Vrancea bölgesinde meydana gelen 5,7 Mw büyüklüğündeki depremin UDF aralığında (0,001-0,0083 Hz) kaydedilen jeomanyetik veriler üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu veriler üzerinde sismik olayın başlangıcından 3 gün önce önemli anormal davranışlar gözlemlenmiştir. Ayrıca depremden 4 gün ve 1 gün önce Swarm uyduları tarafından Vrancea bölgesi üzerindeki iyonosferde manyetik ve elektron konsantrasyonu değişimleri tespit edilmiştir [14]. Tohoku depreminin (Mw 9,0) jeomanyetik günlük değişimler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bunun için depremin merkez üssüne yaklaşık 135 km uzaklıktaki Esashi (ESA) hedef istasyonu ile merkez üssüne yaklaşık 302 km uzaklıktaki uzak referans istasyonu Kakioka (KAK) arasındaki günlük değişim oranları hesaplanmıştır. Sonuçlardan depremden yaklaşık 2 ay önce dikey bileşende istatistiksel eşiği aşan bir anormal davranış tespit edilmiştir. Ayrıca düşey bileşenin depremden yaklaşık 2 ay önce yaklaşık 10 gün boyunca sürekli anormal davranışlar sergilediği gözlemlenmiştir [15]. Japonya'nın Honshu Adası'nda meydana gelen sismik aktivitenin bölgede kaydedilen günlük jeomanyetik değişimler üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Kakioka jeomanyetik gözleminde ve diğer uzak referans istasyonlarında kaydedilenlerle karşılaştırıldığında, merkez üssünün yakınındaki Tohno istasyonundaki yatay jeomanyetik bileşenin günlük değişim genliğinde dikkate değer bir anormal davranış tespit edilmiştir [16].

Bu çalışmalarda, deprem öncesi, deprem anı ve deprem sonrası jeomanyetik alan bileşenlerinde bazı anomaliler meydana geldiği saptanmış ve bu değişimlerin deprem kaynaklı olabileceği önerilmiştir. Ancak bu konu, üzerinde onlarca yıldır yapılan çalışmalara rağmen araştırmacıların çok yoğun bir şekilde çözüm bulmaya çalıştıkları küresel bir problem olmaya devam etmektedir.

Bu çalışmada, 17 Kasım 2021 Düzce depreminin (40,86 °K-30,99 °D, 12:40 EZ, M=4,8) ve 3-4 Kasım 2021 boyunca meydana gelen jeomanyetik fırtınanın günlük jeomanyetik alan değişimleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

2. Materyal ve Metot

Jeomanyetik alanın günlük değişimi, yaklaşık bir günlük periyodikliğe sahip manyetik alan salınımıdır. Bu salınım yerel zamana, coğrafik enlem ve boylama güçlü bir şekilde bağlıdır [17-19]. Genel olarak, jeomanyetik alanın günlük değişimi iki alana bağlı olarak değişmektedir. Bunlar dış ve iç alanlardır. Dış alan, esas olarak güneş rüzgârları kaynaklı jeomanyetik fırtınalar nedeniyle manyetosfer ve iyonosfer bölgelerinde meydana gelen akımlar tarafından oluşturulmaktadır. İç alan ise iletken dünyadan kaynaklıdır ve endüktif bir alandır [7, 10, 13, 19, 20].

Dış alanların etkileri yeraltı kayaları veya iletkenlikler değişmeden kaldığında, yaklaşık 1000 km çaplı bir alan içerisinde bulunan manyetometre istasyonlarında aynı şekilde gözlemlenir ve bu istasyonlar arasındaki jeomanyetik alanın günlük değişim oranları neredeyse sabittir. Bu tür bir sabitlik, bu manyetometrelerden birinin altındaki anormal iç alan tarafından yok edilebilir; bu, ya litosferik iletkenlik değişiklikleri ya da tektonik faaliyetlerle ilişkili akımlar tarafından üretilebilir. Bunun sonucunda depremin merkez üssüne yakın manyetometre istasyonundaki jeomanyetik alan bileşenleri üzerine dahil olan olası sismomanyetik anomaliler gözlemlenebilir. Bu şekilde, depremin merkez

üssüne yakın manyetometre istasyonunda/istasyonlarında (Gözlem Manyetometre İstasyonu) ve depremin merkez üssüne uzak manyetometre istasyonunda/istasyonlarında (Referans Manyetometre İstasyonu) kaydedilen Dünya'nın manyetik alan değişimlerini izlemek ve incelemek, tektonik faaliyetlerle bağlantılı anormal jeomanyetik sinyalleri göreceli olarak tespit etmek için çok etkili bir yöntem olarak kullanılabilir [10, 15].

İlk olarak gözlem ve referans manyetometre istasyonlarını belirlemek için Denklem-1 ile verilen ifade kullanılarak yaklaşan bir depremden etkilenen bölgenin yarıçapı ve Dobrovolsky alanı hesaplanmıştır [21].

$$\rho = 10^{0,43M} \text{ km} \quad (1)$$

burada ρ , deprem hazırlık bölgesinin kilometre cinsinden yarıçapı; M, depremin büyüklüğüdür. 17 Kasım 2021 Düzce depremi (M=4,8) için ρ , yaklaşık olarak 116 km'dir. Gözlem istasyonu/istasyonları, 116 km yarıçapındaki Dobrovolsky alanı içerisinde bulunan manyetometre istasyonu/istasyonlarıdır. Referans istasyonlarının seçimi ise 116 km yarıçaplı Dobrovolsky alanının dışında ve depremin merkez üssünden yaklaşık 1000 km bir çapa sahip alanın içinde konumlanmış manyetometre istasyonlarından yapılmıştır.

Depreminin merkez üssü ve bu deprem için gözlem ve referans istasyonlarının konumları Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'den görüldüğü gibi depremin merkez üssünden yaklaşık 113 km uzaklıkta bulunan (Dobrovolsky alanının içinde) IZN manyetometre istasyonu (40,50 °K-29,72 °D) gözlem istasyonu olarak seçilmiştir. Depremin merkez üssüne sırasıyla yaklaşık 690 km ve 580 km uzaklıkta ve Dobrovolsky alanının dışında bulunan PEG (38,10 °K-23,90 °D) ve PAG (42,51 °K-24,17 °D) manyetometre istasyonları referans manyetometre istasyonları olarak seçilmiştir.



Şekil 1. 17 Kasım 2021 Düzce depremi için tespit edilen gözlem ve referans manyetometre istasyonlarının konumları.

Figure 1. Locations of the observation and reference magnetometer stations determined for the 17 November 2021 Düzce earthquake.

3-4 Kasım 2021 boyunca meydana gelen jeomanyetik fırtınanın ve 17 Kasım 2021 Düzce depreminin günlük jeomanyetik alan üzerindeki etkilerini incelemek için bu manyetometre istasyonlarında 60 saniyelik zamansal çözünürlükle ölçülen jeomanyetik alanın X, Y ve Z bileşenlerinin verileri kullanılmıştır. Bu veriler Uluslararası Gerçek Zamanlı Manyetik Gözlemevi Ağı (INTERMAGNET) kullanılarak indirilmiştir [22]. Ayrıca, jeomanyetik aktivite göstergesi olarak Uluslararası Jeomanyetik İndeksler Servisi (ISGI)'nden elde edilmiş Küresel Jeomanyetik Aktivite İndisi (K_p) verileri kullanılmıştır [23]. $K_p < 2$ değerleri jeomanyetik olarak sakin, $2 \leq K_p < 4$ değerleri jeomanyetik olarak kararsız, $K_p \geq 4$ değerleri ise jeomanyetik olarak aktif durumu göstermektedir [24].

Jeomanyetik fırtınalardan ve depremlerden kaynaklı jeomanyetik anomalileri tespit etmek için sırasıyla Denklem-2 ve Denklem-3'de X bileşeni için verilen jeomanyetik alan değişim oranı (ROG) ve jeomanyetik alan değişim oranı indeksi (ROGI) her istasyonun jeomanyetik alan bileşenleri (X, Y, Z) için hesaplanmıştır.

$$\text{ROG}(X)(t_k) = \frac{(X_k - X_{k-1})}{t_k - t_{k-1}} \quad (2)$$

burada k, manyetometrelerin ölçüm yaptığı her bir dakikayı temsil etmektedir.

$$ROGI(X) = \sqrt{\langle ROG(X)^2 \rangle + \langle ROG(X) \rangle^2} \quad (3)$$

burada $\langle ROG(X) \rangle$, belirli bir periyot boyunca $ROG(X)$ 'in ortalama değerini temsil eder. Birimi $nT \text{ dk}^{-1}$ dir. Denklem-3 için 5 dakikalık bir periyot zamanı seçilmiştir. Toplam Elektron İçeriği (TEC)'ndeki anomalileri tespit etmek için kullanılan Denklem-2 ve Denklem-3'deki ifadeler, bu çalışmada jeomanyetik alan verilerindeki anomalileri tespit etmek için jeomanyetik alan verilerine uygulanmıştır [25-28]. Analizler, jeomanyetik fırtınanın ve depremin jeomanyetik alan üzerindeki etkisini incelemek için 2-6 Kasım 2021 (3-4 Kasım 2021 jeomanyetik fırtına) ve 15-19 Kasım 2021 (17 Kasım 2021 Düzce depremi) dönemleri boyunca uygulanmıştır. Elde edilen $ROGI(X, Y, Z)$ değerleri kullanılarak istasyon çiftleri (IZN-PEG, PEG-PAG, IZN-PAG) için korelasyon katsayıları (r) hesaplanmıştır. Bu dönemler boyunca jeomanyetik alanın herbir bileşeni (X, Y, Z) için gözlem ve referans manyetometre istasyonlarından elde edilen sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

3. Bulgular

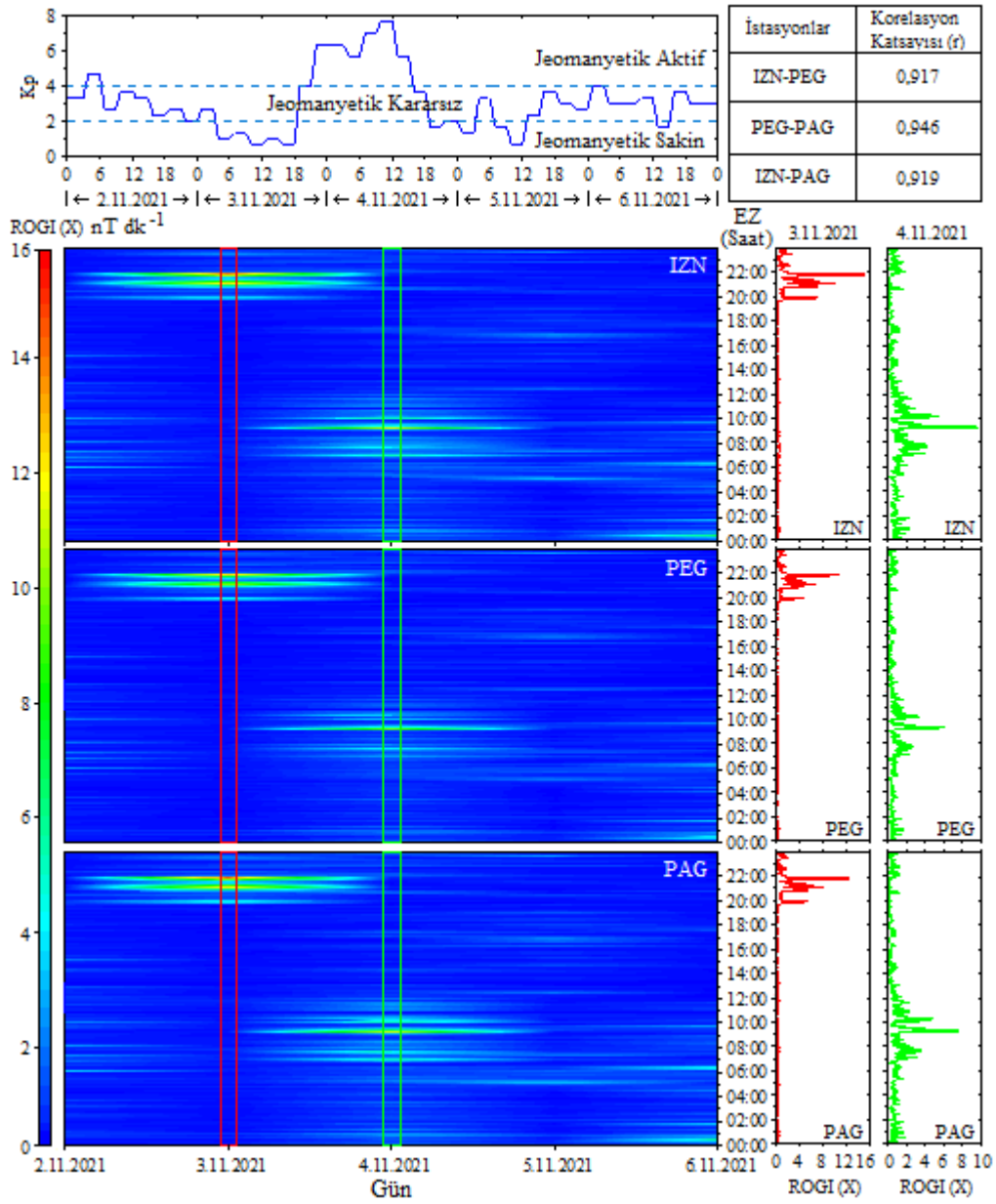
Şekil 2, 3 ve 4, 2-6 Kasım 2021 boyunca K_p 'nin, IZN, PEG ve PAG manyetometre istasyonları için hesaplanan sırasıyla $ROGI(X)$, $ROGI(Y)$ ve $ROGI(Z)$ değerlerinin günlük değişimlerini ve farklı istasyon çiftleri için korelasyon katsayılarını göstermektedir.

Şekil 2-4'de görüldüğü gibi K_p , 2.11.2021 00:00 EZ ve 3.11.2021 18:00 EZ arasında çoğunlukla 4'den küçük değerlere sahiptir. Jeomanyetik aktivite kararsız ve sakin bir durum sergilemektedir. 3.11.2021 18:00 EZ'den itibaren K_p değerleri yükselerek 4.11.2021 09:00 EZ-11:00 EZ arasında 7,7'lik maksimum değerine ulaşmıştır. Bu saatten sonra K_p , 4.11.2021 18:00 EZ'de 1,7'lik değerine kadar azalmıştır. K_p 'nin 3 Kasım 18:00 EZ'den 4 Kasım 18:00 EZ'ye kadar sahip olduğu değerler bu süre boyunca şiddetli bir jeomanyetik fırtınanın meydana geldiğini göstermektedir. Bu saatten 6 Kasım 23:00 EZ'ye kadar K_p tekrar $K_p \leq 4$ değerleri ile kararsız ve sakin bir jeomanyetik aktivite durumuna sahiptir. 3.11.2021 00:00 EZ ile 18:00 EZ arasında K_p çoğunlukla 2'den küçük değerlere sahiptir. Şekil 2, 3 ve 4 incelediğinde, bu saatler boyunca gözlem (IZN) ve referans (PEG, PAG) manyetometre istasyonları için hesaplanan $ROGI(X)$, $ROGI(Y)$ ve $ROGI(Z)$

değerlerinde artış meydana gelmediği görülmektedir. K_p , 18:00 EZ'den itibaren hızlı bir şekilde artarak 21:00 EZ'de 6,3'lük değere ulaşmıştır.

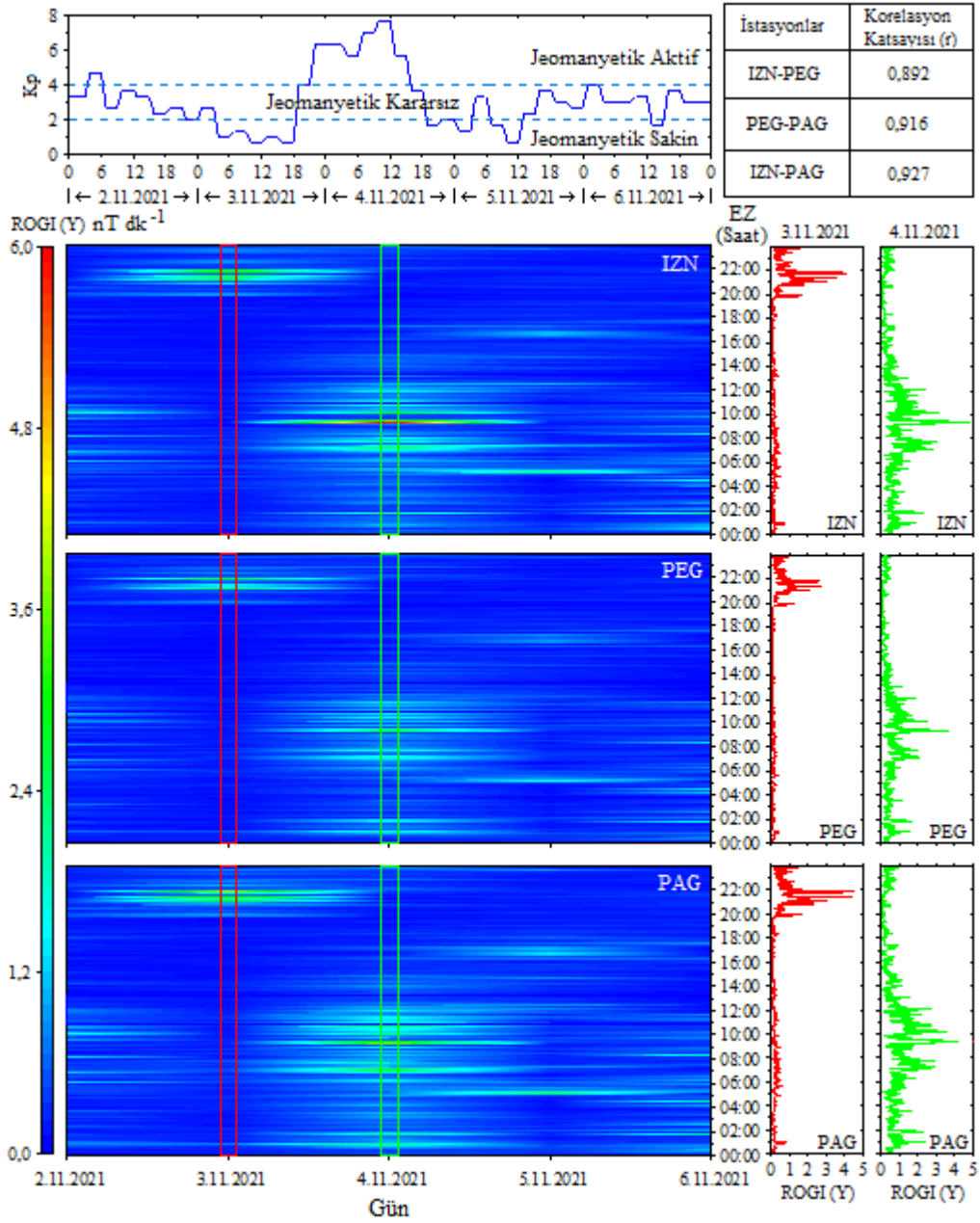
K_p değerindeki artışla birlikte, gözlem (IZN) ve referans (PEG, PAG) manyetometre istasyonları için hesaplanan $ROGI(X)$, $ROGI(Y)$ ve $ROGI(Z)$, 20:00 EZ'de artarak 21:30 EZ civarında maksimum değerlerine ulaşmıştır. Bu saatten sonra üç istasyon içinde $ROGI(X)$, $ROGI(Y)$ ve $ROGI(Z)$ değerleri azalarak denge konumuna (0 nT dk^{-1}) yaklaşılmaya başlamıştır. 4 Kasım için K_p , 00:00 EZ'de 6,3 değere sahiptir. 03:00 EZ ile 05:00 EZ arasındaki 5,7'lik bir dalgalanmadan sonra artarak 09:00 EZ-11:00 EZ'de 7,7'lik maksimum değerine ulaşmıştır. K_p , bu saatten sonra azalarak 18:00 EZ'de 1,7 değerine ulaşmıştır. 00:00 EZ ile 18:00 EZ arasında K_p değerleri, jeomanyetik fırtınanın devam ettiğini ve en şiddetli zamanın 09:00 EZ olduğunu göstermektedir. K_p , 18:00 EZ ile 23:00 EZ arasında ise 2'den küçük değerleri ile jeomanyetik sakin bir durum sergilemektedir. Şekil 2, 3 ve 4'de görüldüğü gibi, 4.11.2021 boyunca gözlem (IZN) ve referans (PEG, PAG) manyetometre istasyonları için hesaplanan $ROGI(X)$, $ROGI(Y)$ ve $ROGI(Z)$ değerleri 00:00 EZ ile 13:00 EZ arasında jeomanyetik aktivite ile ilişkili olarak birbirine benzer kararsız bir yapı sergilemektedir. Tüm istasyonlar için $ROGI(X)$, $ROGI(Y)$ ve $ROGI(Z)$ değerlerindeki en büyük sapma K_p 'nin maksimumuna ulaştığı 09:00 EZ'de meydana gelmiştir. Bu saatten sonra $ROGI(X)$, $ROGI(Y)$ ve $ROGI(Z)$ değerleri azalarak 13:00 EZ'den sonra denge konumu (0 nT dk^{-1}) civarında değerler almıştır. Ayrıca 2-6.11.2021 boyunca hesaplanmış $ROGI(X)$, $ROGI(Y)$ ve $ROGI(Z)$ değerleri kullanılarak istasyon çiftleri için hesaplanan korelasyon katsayıları tüm bileşenler için 0,8'den büyük değerlere sahiptir.

Şekil 5, 6 ve 7, 15-19 Kasım 2021 boyunca K_p 'nin, IZN, PEG ve PAG manyetometre istasyonları için hesaplanan sırasıyla $ROGI(X)$, $ROGI(Y)$ ve $ROGI(Z)$ değerlerinin günlük değişimlerini ve farklı istasyon çiftleri için korelasyon katsayılarını göstermektedir. Şekil 5-7'de görüldüğü gibi K_p , 15.11.2021 18:00 EZ ve 16.11.2021 05:00 EZ arasındaki saatler dışında tüm saatler için 4'den küçük değerler ile jeomanyetik kararsız ve jeomanyetik sakin bir yapı sergilemektedir.



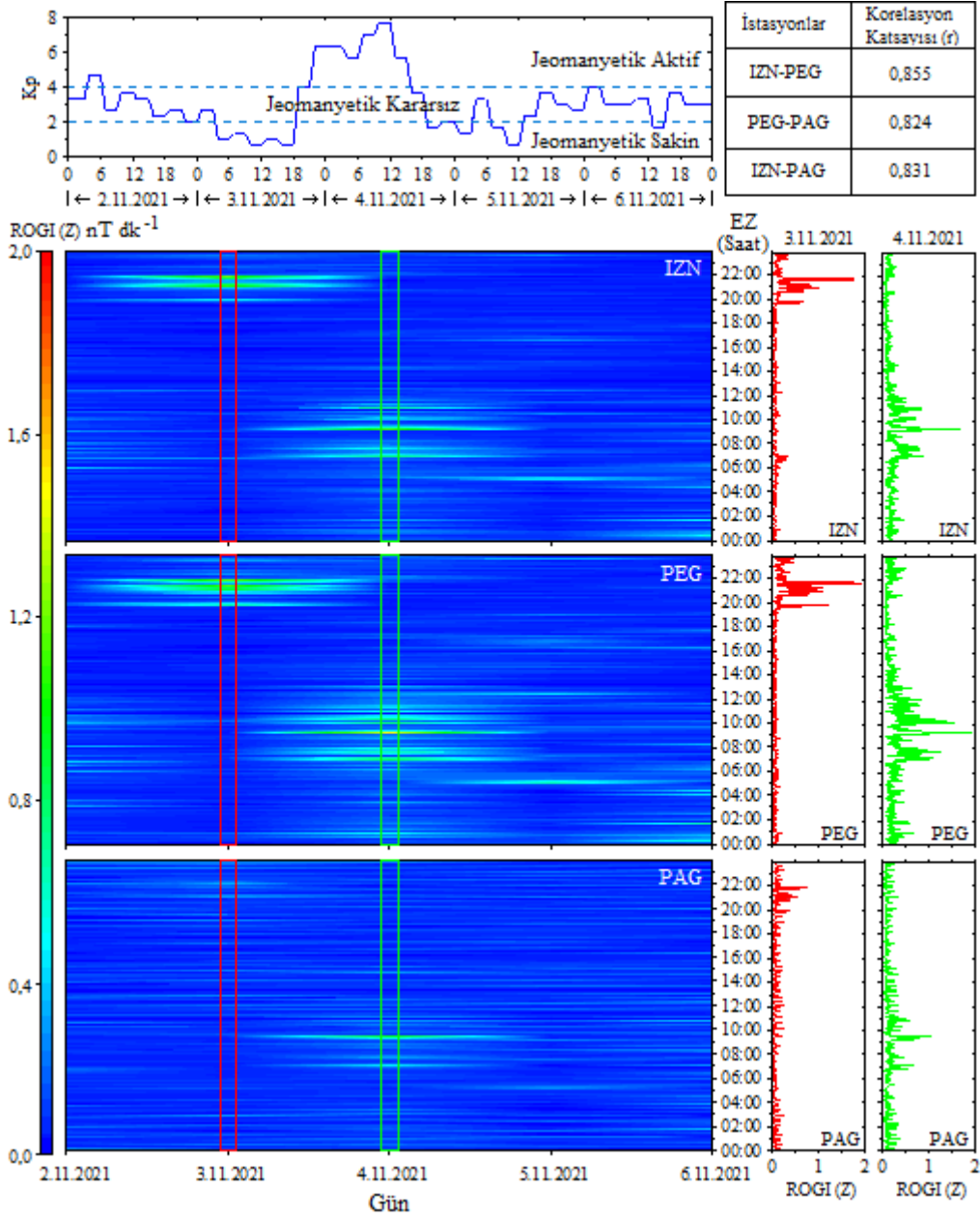
Şekil 2. 2-6 Kasım 2021 boyunca K_p 'nin, IZN, PEG ve PAG manyetometre istasyonları için $ROGI(X)$ 'in günlük değişimleri ve korelasyon katsayıları (r) (Kırmızı ve yeşil dikdörtgenler sırasıyla 3.11.2021 ve 4.11.2021 günlerini, kırmızı ve yeşil eğriler ise bu günler için manyetometre istasyonlarımızda hesaplanan $ROGI(X)$ değerlerinin günlük değişimlerini göstermektedir).

Figure 2. Daily variations of K_p and $ROGI(X)$ for IZN, PEG and PAG magnetometer stations during 2-6 November 2021 and correlation coefficients (r) (The red and green rectangles show the 3.11.2021 and 4.11.2021, respectively, and the red and green curves show the daily changes of the $ROGI(X)$ values calculated at magnetometer stations for these days).



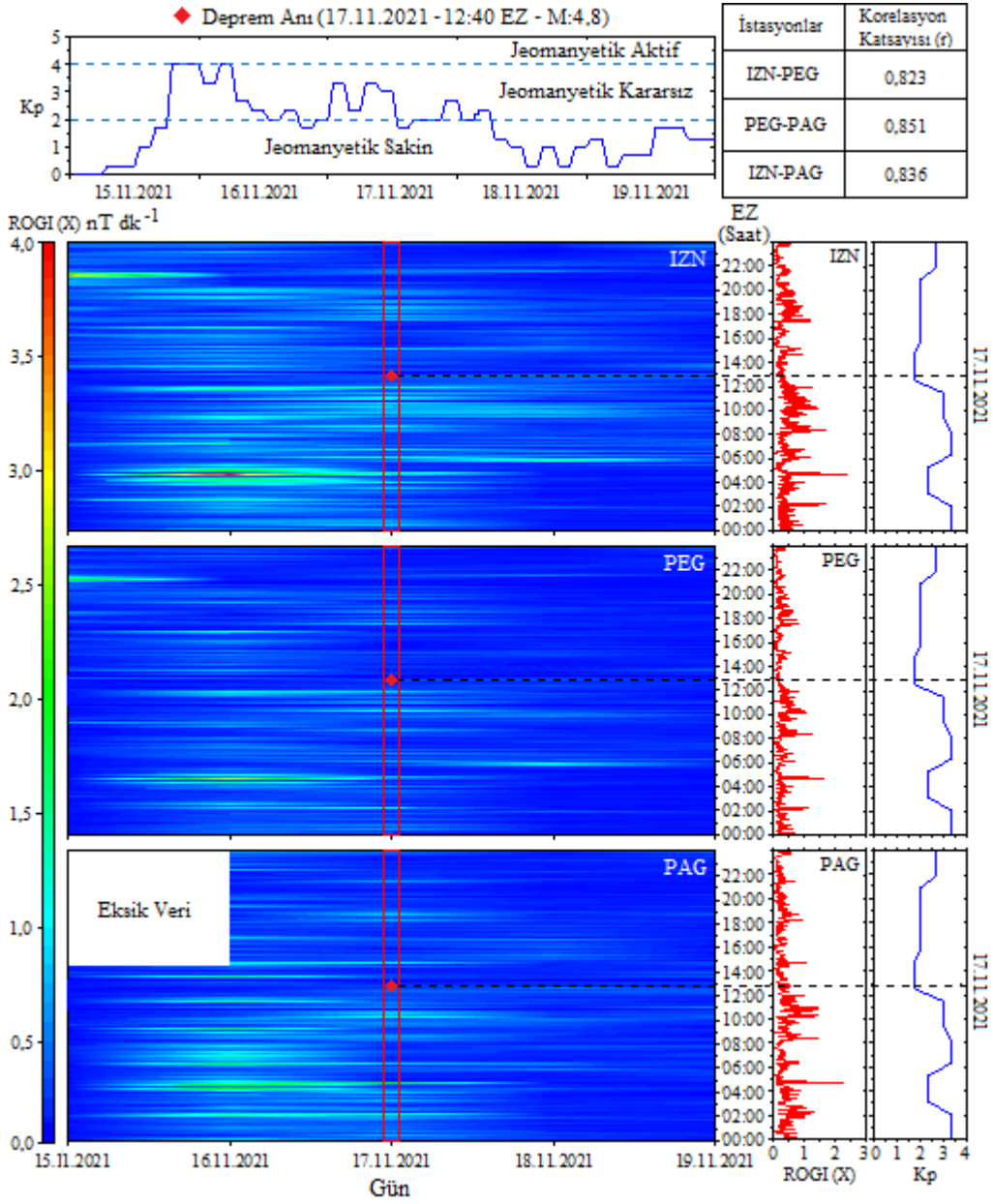
Şekil 3. 2-6 Kasım 2021 boyunca K_p 'nin, IZN, PEG ve PAG manyetometre istasyonları için $ROGI(Y)$ 'nin günlük değişimleri ve korelasyon katsayıları (r) (Semboller ve açıklamalar Şekil 2'deki gibidir).

Figure 3. Daily variations of K_p and $ROGI(Y)$ for IZN, PEG and PAG magnetometer stations during 2-6 November 2021 and correlation coefficients (r) (Symbols and explanations are as in Figure 2).



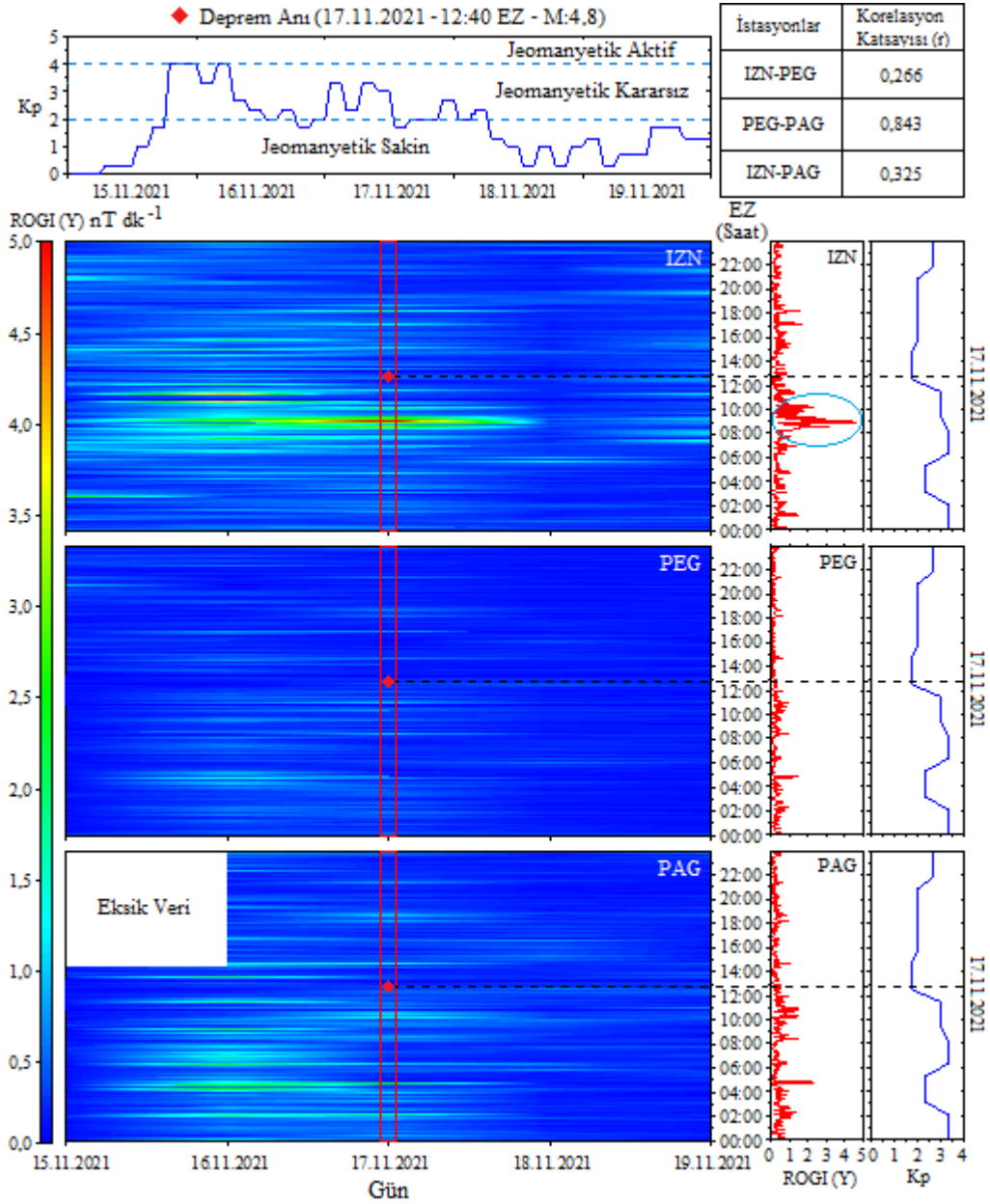
Şekil 4. 2-6 Kasım 2021 boyunca K_p 'nin, IZN, PEG ve PAG manyetometre istasyonları için $ROGI(Z)$ 'nin günlük değişimleri ve korelasyon katsayıları (r) (Semboller ve açıklamalar Şekil 2'deki gibidir).

Figure 4. Daily variations of K_p and $ROGI(Z)$ for IZN, PEG and PAG magnetometer stations during 2-6 November 2021 and correlation coefficients (r) (Symbols and explanations are as in Figure 2).



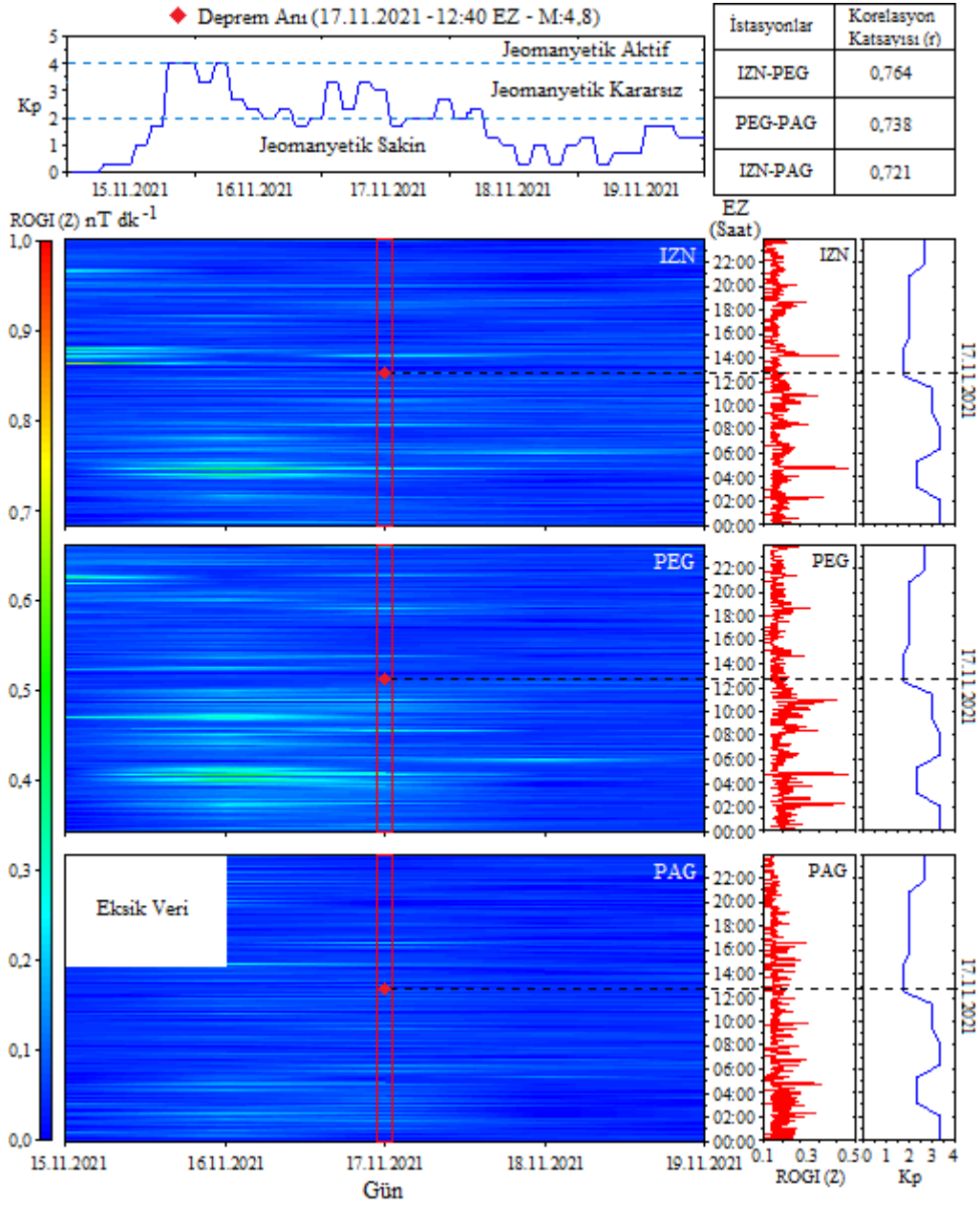
Şekil 5. 15-19 Kasım 2021 boyunca K_p 'nin, IZN, PEG ve PAG manyetometre istasyonları için $ROGI(X)$ 'in günlük değişimleri ve korelasyon katsayıları (r) (Kırmızı dikdörtgen 17.11.2021 gününü, kırmızı küçük dörtgen deprem anını, kırmızı eğriler ise 17.11.2021 günü boyunca IZN, PEG ve PAG istasyonları için hesaplanan $ROGI(X)$ değerlerinin günlük değişimlerini göstermektedir).

Figure 5. Daily variations of K_p and $ROGI(X)$ for IZN, PEG and PAG magnetometer stations during 15-19 November 2021 and correlation coefficients (r) (The red rectangle shows the 17.11.2021, red small square shows earthquake moment and red curves show the daily changes of the $ROGI(X)$ values calculated for the IZN, PEG and PAG magnetometer stations on 17.11.2021).



Şekil 6. 15-19 Kasım 2021 boyunca K_p 'nin, IZN, PEG ve PAG manyetometre istasyonları için ROGI(Y)'nin günlük değişimleri ve korelasyon katsayıları (r) (Semboller ve açıklamalar Şekil 5'deki gibidir).

Figure 6. Daily variations of K_p and ROGI(Y) for IZN, PEG and PAG magnetometer stations during 15-19 November 2021 and correlation coefficients (r) (Symbols and explanations are as in Figure 5).



Şekil 7. 15-19 Kasım 2021 boyunca K_p 'nin, IZN, PEG ve PAG manyetometre istasyonları için $ROGI(Z)$ 'nin günlük değişimleri (Semboller ve açıklamalar Şekil 5'deki gibidir).

Figure 7. Daily variations of K_p and $ROGI(Z)$ for IZN, PEG and PAG magnetometer stations during 15-19 November 2021 and correlation coefficients (r) (Symbols and explanations are as in Figure 5).

Deprem meydana geldiği 17.11.2021 günü boyunca Dobrovolsky alanı içerisinde bulunan gözlem manyetometre istasyonu (IZN) ve Dobrovolsky alanı dışında bulunan referans manyetometre istasyonları (PEG, PAG) için hesaplanan ROGI(X) ve ROGI(Z) değerleri depremin öncesinde deprem anında ve deprem sonrasında birbirine çok benzer günlük değişim sergilemektedirler. Ayrıca, depremin meydana geldiği 17.11.2021'den önceki 15-16.11.2021 ve sonraki 18-19.11.2021 boyunca gözlem manyetometre istasyonu (IZN) ve referans manyetometre istasyonları (PEG, PAG) için hesaplanan ROGI(X) ve ROGI(Z) değerleri de benzer günlük değişimler sergilemektedirler. 15-19.11.2021 boyunca ROGI(X) ve ROGI(Z) değerleri kullanılarak istasyon çiftleri için hesaplanan korelasyon katsayılarının tümü 0,7'den daha büyük değerlere sahiptir.

Ancak depremin meydana geldiği 17.11.2021 günü boyunca IZN, PEG ve PAG manyetometre istasyonları için hesaplanan ROGI(Y) değerlerinin günlük değişimleri, ROGI(X) ve ROGI(Z) değerlerinin günlük değişimlerinden farklı bir yapı sergilemektedir. Deprem meydana geldiği 17.11.2021 için küresel jeomanyetik aktivite indisi $K_p < 4$ değerleri ile gün boyunca jeomanyetik kararsız ve jeomanyetik sakin bir yapıya sahiptir. Şekil 6'yı incelediğimizde, Dobrovolsky alanı dışında bulunan referans manyetometre istasyonları (PEG, PAG) için hesaplanan ROGI(Y) değerlerinin 17.11.2021 günü boyunca birbirleriyle tam uyumlu bir günlük değişime sahip oldukları net bir şekilde görülmektedir. Ancak günün belirli bir zaman aralığı boyunca Dobrovolsky alanı içerisindeki gözlem manyetometre istasyonu (IZN) için hesaplanan ROGI(Y) değerlerinde, referans manyetometre istasyonları (PEG, PAG) için hesaplanan ROGI(Y) değerlerinden farklı olarak büyük bir artış (anomali) meydana gelmiştir. Bu artış, Şekil 6'da mavi renkli daire içinde gösterilmiştir. IZN için ROGI(Y) değerleri 17.11.2021 00:00 EZ'den 08:15 EZ'ye kadar PEG ve PAG istasyonlarının ROGI(Y) değerleri ile benzer bir değişime sahiptir. Depremden 4 saat 25 dakika önce yani 08:15 EZ'de ROGI(Y) değeri artmaya başlamış, 08:55 EZ'de 4,7 nT dk¹'lik maksimum değerine ulaştıktan sonra azalarak 10:10 EZ civarında denge konumuna (0 nT dk⁻¹) yaklaşmıştır.

Ayrıca Şekil 6'da görüldüğü gibi, 15-19.11.2021 boyunca ROGI(Y) değerleri kullanılarak IZN-PEG ve IZN-PAG istasyonları için hesaplanan korelasyon katsayıları sırasıyla 0,266 ve 0,325 değerlerine sahip iken, PEG-PAG istasyon çifti için hesaplanan korelasyon katsayısı 0,843 değerine sahiptir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada, 3-4 Kasım 2021 boyunca meydana gelen jeomanyetik fırtınanın ve 17 Kasım 2021 Düzce depreminin gözlem (IZN) ve referans (PEG, PAG) manyetometre istasyonlarında ölçülmüş jeomanyetik alanlar üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Jeomanyetik fırtınanın meydana geldiği 3-4 Kasım 2021 boyunca Dobrovolsky alanı içerisinde bulunan gözlem manyetometre istasyonu (IZN) ve Dobrovolsky alanı dışında bulunan referans manyetometre istasyonları (PEG, PAG) için hesaplanan ROGI(X), ROGI(Y) ve ROGI(Z) değerleri çok benzer günlük değişime sahiptirler. 2-6.11.2021 boyunca istasyon çiftleri için ROGI(X), ROGI(Y) ve ROGI(Z) değerleri arasında hesaplanan korelasyon katsayıları tüm bileşenler için 0,8'den daha büyük değerlere sahiptir. Korelasyon katsayılarının bu değerleri, hem jeomanyetik aktif hem de jeomanyetik sakin saatler için gözlem ve referans istasyonlarındaki ROGI(X), ROGI(Y) ve ROGI(Z) değerlerinin günlük değişimleri arasında çok güçlü bir istatistiksel ilişki olduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, üç farklı istasyonda ölçülen jeomanyetik alan bileşenlerinin, günün her saatinde jeomanyetik fırtınaya benzer şekilde tepki verdiğini ve jeomanyetik fırtınanın jeomanyetik alan üzerinde küresel bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. [17, 18, 29-32].

17.11.2021 günü boyunca gözlem manyetometre istasyonu (IZN) ve referans manyetometre istasyonları (PEG, PAG) için hesaplanan ROGI(X) ve ROGI(Z) değerleri, deprem öncesinde, deprem anında ve deprem sonrasında birbirine çok benzer günlük değişim sergilemektedirler. 15-19.11.2021 boyunca istasyon çiftleri için ROGI(X) ve ROGI(Z) değerleri arasında hesaplanan korelasyon katsayıları, tüm bileşenler için 0,7'den büyük değerlere sahiptir. Bu değerler hem gözlem hem de referans istasyonlarındaki ROGI(X) ve ROGI(Z)'nin günlük değişimleri arasında güçlü

bir istatistiksel ilişki olduğunu göstermektedir. Bu istatistiksel ilişki, 17 Kasım 2021 depreminin gözlem istasyonunun X ve Z bileşenleri üzerinde herhangi bir etki meydana getirmediğini ortaya koymaktadır.

17 Kasım 2021 için PEG ve PAG istasyonlarının ROGI (Y) değerleri birbirleriyle benzer bir günlük değişime sahipken, 08:15 EZ ile 10:10 EZ arasında IZN istasyonunun ROGI(Y) değerlerinde büyük bir artış (anomali) meydana gelmiştir. Bu sonuç, 15.11.2021 ile 19.11.2021 tarihleri arasında ROGI(Y) değerleri kullanılarak istasyon çiftleri için hesaplanan korelasyon katsayılarından da açıkça görülmektedir. IZN-PEG ve IZN-PAG istasyon çifti için hesaplanan korelasyon katsayıları sırasıyla 0,266 ve 0,325 iken, PEG-PAG istasyon çifti için hesaplanan korelasyon katsayısı 0,843'tür. Dobrovolsky alanı dışındaki istasyonların ROGI(Y) değerleri için elde edilen korelasyon katsayısının büyük değeri, referans istasyonlarda ölçülen Y değerlerinin günlük değişimleri arasında güçlü bir istatistiksel ilişki olduğunu göstermektedir. Ancak IZN-PEG ve IZN-PAG istasyon çiftleri için hesaplanan korelasyon katsayılarının küçük değerleri ise Dobrovolsky alanı içindeki IZN istasyonunda ölçülen Y değerlerinin günlük değişimleri ile Dobrovolsky alanı dışındaki PEG ve PAG istasyonlarında ölçülen Y değerlerinin günlük değişimleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmadığını göstermektedir.

Yalnızca Dobrovolsky alanında konumlanmış IZN istasyonunun ROGI(Y) değerlerinde bir anomali gözlemlenmesinden dolayı, bu anomalinin bölgesel etkiden kaynaklı olabileceği ve 17 Kasım Düzce depremi ile olası ilişkili sismomanyetik kaynaklı öncül bir jeomanyetik anomali olarak değerlendirilebileceği öngörülmektedir.

Yapılan çalışmalar, sismik faaliyetlerin hazırlık döneminde, depremlerin merkez üssü çevresinde ve üzerinde litosferik ve iyonosferik manyetik anomalilerin gözlemlendiğini ortaya koymaktadır [7-16]. Bu çalışma için gözlenen anormal davranış, sismik olayın olduğu gün boyunca depremin merkez üssü civarındaki (Dobrovolsky Alanı) IZN istasyonunda ölçülen Y bileşenin günlük değişiminde meydana gelmiştir. Bu sonuç, sismik aktivite ile ilişkili yeraltı iletkenliği değişiminin, incelenen alanın günlük jeomanyetik değişimleri üzerinde

dikkate değer bir etkiye sahip olabileceğini göstermektedir. Ancak gözlemlenen anomalinin deprem ile ilişkili olup olmadığının ve fiziksel bir mekanizmayı yansıtmadığının net bir şekilde ortaya konulabilmesi, çok daha fazla deprem için jeomanyetik alan verisinin analizi ile mümkün olabilecektir.

4. Discussion and Conclusion

In this study, the effects of the 3-4 November 2021 geomagnetic storm and the 17 November 2021 Düzce earthquake on the geomagnetic fields measured at the observation (IZN) and reference (PEG, PAG) magnetometer stations were investigated.

During 3-4 November 2021 geomagnetic storm, the ROGI(X), ROGI(Y) and ROGI(Z) values calculated from the observation magnetometer station (IZN) located inside the Dobrovolsky area and the reference magnetometer stations (PEG, PAG) located outside the Dobrovolsky area have very similar daily variations. The correlation coefficients calculated between ROGI(X), ROGI(Y) and ROGI(Z) values for station pairs during 2-6.1.2021 have values greater than 0,8 for all components. These values of the correlation coefficients show that there is a very strong statistical relationship between the daily variations of ROGI(X), ROGI(Y) and ROGI(Z) values at the observation and reference stations for both geomagnetic active and geomagnetic quiet hours. These results show that the geomagnetic field components measured at three different stations respond similarly to the geomagnetic storm during all hours of the day and the geomagnetic storm has a global effect on the geomagnetic field [17, 18, 29-32].

ROGI(X) and ROGI(Z) values calculated for the observation magnetometer station (IZN) and reference magnetometer stations (PEG, PAG) on 17.11.2021 show very similar daily changes before, during and after the earthquake. The correlation coefficients calculated between ROGI(X) and ROGI(Z) values for station pairs during 15-19.11.2021 have values greater than 0,7 for all components. These values show that there is a strong statistical relationship between the daily changes of ROGI(X) and ROGI(Z) at both the observation and reference stations. This statistical relationship reveals that the 17 November 2021 earthquake did not have any

effect on the X and Z components of the observation station.

For 17 November 2021, the ROGI (Y) values of PEG and PAG stations have a similar daily variation, while a large increase (anomaly) occurred in the ROGI(Y) values of the IZN station between 08:15 EZ and 10:10 EZ. This result is also clearly seen from the correlation coefficients calculated for the station pairs using the ROGI(Y) values between 15.11.2021 and 19.11.2021. While the correlation coefficients calculated for the IZN-PEG and IZN-PAG station pairs are 0,266 and 0,325, respectively, the correlation coefficient calculated for the PEG-PAG station pair is 0,843. The large value of correlation coefficient obtained for the ROGI(Y) values of the stations outside the Dobrovolsky area shows that there is a strong statistical relationship between the daily changes of the Y values measured at the reference stations. However, the small values of the correlation coefficients calculated for the IZN-PEG and IZN-PAG station pairs show that there is no statistically significant relationship between the daily changes of the Y values measured at the IZN station inside the Dobrovolsky area and the daily changes of the Y values measured at the PEG and PAG stations outside the Dobrovolsky area.

Since an anomaly was only observed in the ROGI(Y) values of the IZN station located inside the Dobrovolsky area, it is predicted that this anomaly may be caused by a regional effect and can be considered as a premise geomagnetic anomaly, possibly related to the 17 November Düzce earthquake.

Studies show that lithospheric and ionospheric magnetic anomalies are observed around and above the epicenter of earthquakes during the preparation period of seismic activities [7-16]. The anomalous behavior observed for this study occurred in the daily variation of the Y component measured at the IZN station around the earthquake epicenter (Dobrovolsky Area) during the the earthquake day. This result indicates that subsurface conductivity variation associated with seismic activity can have a remarkable effect on the diurnal geomagnetic variations of the studied area. However, it will be possible to clearly reveal whether the observed anomaly is related to the earthquake and whether it reflects a physical mechanism,

by analyzing the geomagnetic field data for many more earthquakes.

5. Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Teşekkür

Yazarlar, jeomanyetik alan ve jeomanyetik aktivite indisi verilerini erişilebilir kıldıkları için Uluslararası Gerçek Zamanlı Manyetik Gözlemevi Ağı (INTERMAGNET) ve Uluslararası Jeomanyetik İndeksler Servisi (ISGI) çalışma grubuna teşekkür eder.

Kaynakça

- [1] Moore, G.W. 1964. Magnetic Disturbances preceding the 1964 Alaska Earthquake, *Nature*, Cilt. 203, s. 508-509. DOI: 10.1038/203508b0.
- [2] Rikitake, T. 1987. Earthquake precursors in Japan: Precursor time and detectability, *Tectonophysics*, Cilt. 136, s. 265-282. DOI: 10.1016/0040-1951(87)90029-1.
- [3] Nagata, T. 1969. Effects of a uniaxial compression on remanent magnetization of igneous rocks, *Pure and Applied Geophysics*, Cilt. 78, s.100-109. DOI: 10.1007/BF00874778.
- [4] Nagata, T. 1969. Anisotropic magnetic susceptibility of rocks under mechanical stresses, *Pure and Applied Geophysics*, Cilt. 78, s. 110-122.
- [5] Revol, J., Day, Ron., Fuller, M. D. 1977. Magnetic behavior of magnetite and rocks stressed to failure-Relation to earthquake prediction, *Earth and Planetary Science Letters*, Cilt. 37, s. 296-306. DOI:10.1016/0012-821X(77)90175-3.
- [6] Kapička, A., Petrovsky, E., Pohl, J. 1997. Magnetic anisotropy of rock under stress conditions of the Earth's crust (laboratory modeling), *Physics and Chemistry of the Earth*, Cilt. 22, s. 157-160. DOI: 10.1016/S0079-1946(97)00095-5.
- [7] Mele, G., Meloni, A., Palangio, P. 1994. A tectonomagnetic effect detected in Central Italy, *Annals Geophysics*, Cilt. 37, s. 17-25. DOI: 10.4401/ag-4233.
- [8] Meloni, A., Mele, G., Palangio, P. 1998. Tectonomagnetic field observations in central Italy 1989-1995, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Cilt. 105, s. 145-152. DOI: 10.1016/S0031-9201(97)00087-3
- [9] Hattori, K. 2004. ULF Geomagnetic Changes Associated with Large Earthquakes, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, Cilt.15, s. 329-360. DOI: 10.3319/TAO.2004.15.3.329(EP).
- [10] Chen, C., H., Liu, J.Y., Lin, P.Y., Yen, H.Y., Hattori, K., Liang, W.T., Chen, Y. I., Yeh, Y. H., Zeng, X. 2010. Pre-seismic geomagnetic anomaly and earthquake location, *Tectonophysics*, Cilt. 489, s. 240-247. DOI: 10.1016/j.tecto.2010.04.018.
- [11] Takla, E. M., Yumoto, K., Liu, J. Y., Kakinami, Y., Uozumi, T., Abe, S., Ikeda, A. 2011. Anomalous

- Geomagnetic Variations Possibly Linked with the Taiwan Earthquake (Mw = 6.4) on 19 December 2009, *International Journal of Geophysics*, Cilt. 2011, s. 1-10. DOI: 10.1155/2011/848467.
- [12] Takla, E.M., Yumoto, K., Okano, S., Uozumi, T., Abe, S. 2013. The signature of the 2011 Tohoku mega earthquake on the geomagnetic field measurements in Japan, *National Research Institute of Astronomy and Geophysics*, Cilt. 2, s. 185-195. DOI: 10.1016/j.nrjag.2013.08.001.
- [13] Cordaro, E. G., Aravena, P.V., Laroze, D. 2021. Long-term magnetic anomalies and their possible relationship to the latest greater Chilean earthquakes in the context of the seismo-electromagnetic theory, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Cilt. 21, s. 1785-1806. DOI: 10.5194/nhess-21-1785-2021.
- [14] Stanica, D.A., Stanica, D., Blecki, J., Ernst, T., Jozwiak, W., Słominski J. 2018. Pre-seismic geomagnetic and ionosphere signatures related to the Mw5.7 earthquake occurred in Vrancea zone on September 24, 2016, *Acta Geophysica*, Cilt. 66, s. 167-177. DOI: 10.1007/s11600-018-0115-4.
- [15] Xu, G., Han, P., Huang, Q., Hattori, K., Febriani, F., Yamaguchi, H. 2013. Anomalous behaviors of geomagnetic diurnal variations prior to the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake (Mw9.0), *Journal of Asian Earth Sciences*, Cilt. 77, s. 59-65. DOI: 10.1016/j.jseae.2013.08.011.
- [16] Takla, E.M., Yoshikawa, A., Uozumi, T. 2018. A Possible Influence of Seismic Activity on Diurnal Geomagnetic Variations, *Journal of Geology and Geophysics*, Cilt.7, s. 1-6. DOI:10.4172/2381-8719.1000451
- [17] Pröls, G.W. 2004. *Physics of the Earth's Space Environment*. 1st, Berlin: Springer, 514s.
- [18] Tascione, T.F. 2010. *Introduction to the Space Environment*. 2nd, Los Angeles: Krieger Publishing Company, 172s.
- [19] Masci, F., Thomas, J.N. 2015. Are there new findings in the search for ULF magnetic precursors to earthquakes?, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Cilt. 120, s. 10.289-10.304. DOI: 10.1002/2015JA021336.
- [20] Yusupov, V., 2018. Anomalies of geomagnetic field related to natural and technogenic events in Charvak area, *Geodesy and Geodynamics*, Cilt. 9, s. 367-371. DOI: 10.1016/j.geog.2018.05.002.
- [21] Dobrovolsky, I. R., Zubkov, S.I., Myachkin, V.I. 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones, *Pure and Applied Geophysics*, Cilt. 117, s. 1025-1044. DOI: 10.1007/BF00876083.
- [22] International Real-time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET). "Observatories". <https://www.intermagnet.org/imos/imotblobs-eng.php>. (Erişim Tarihi: 16.04.2022).
- [23] International Service of Geomagnetic Indices (ISGI). "Geomagnetic Indices". <http://isgi.unistra.fr>. (Erişim Tarihi: 16.04.2022).
- [24] Aurora Borealis Observatory. <https://auroraborealisobservatory.com/2020/12/28/the-kp-index-any-good-for-aurora-chasing/>. (Erişim Tarihi: 16.04.2022).
- [25] Pi, X., Mannucci, A.J., Lindqwister, U.J., Ho, C.M. 1997. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network, *Geophysical Research Letters*, Cilt. 24, s. 2283-2286. DOI: 10.1029/97GL02273.
- [26] Mendillo, M., Lin, B., Aarons, J. 2000. The application of GPS observations to equatorial aeronomy, *Radio Science*, Cilt. 35 s. 885-904. DOI: 10.1029/1999RS002208.
- [27] Timoçin, E., Inyurt, S., Temuçin, H., Ansari, K., Jamjareegulgarn, P. 2020. Investigation of equatorial plasma bubble irregularities under different geomagnetic conditions during the equinoxes and the occurrence of plasma bubble suppression, *Acta Astronautica*, Cilt. 177, s. 341-350. DOI: 10.1016/j.actaastro.2020.08.007.
- [28] Timoçin, E., Temuçin, H., Inyurt, S. 2022. The Seasonal Characteristics of Equatorial Plasma Bubbles in Conjugate Hemispheres During 2015, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2022, Cilt. 62, s. 309-323. DOI: 10.1134/S0016793222030203.
- [29] Gonzalez, W.D., Joselyn, J.A., Kamide, Y., Kroehl, H.W., Rostoker, G., Tsurutani, B.T. Vasyliunas, V.M. 1994. What is a geomagnetic storm?, *Journal of Geophysical Research Atmospheres: Space Physics*, Cilt. 99, s. 5771-5792. DOI: 10.1029/93JA02867.
- [30] Venkatesan, D., Ananth, A.G., Graumann, H., Pillai, S. 1991. Relationship between solar and geomagnetic activity, *Journal of Geophysical Research Atmospheres: Space Physics*, Cilt. 96, s. 9811-9813. DOI: 10.1016/j.jastp.2004.03.011.
- [31] Lakhina, G.S., Tsurutani, B.T. 2016. Geomagnetic storms: historical perspective to modern view, *Geoscience Letters*, Cilt. 3:5, s. 1-11. DOI: 10.1186/s40562-016-0037-4.
- [32] Adebisin, B.O. 2016. Investigation into the linear relationship between the AE, Dst and ap indices during different magnetic and solar activity conditions, *Acta Geodaetica et Geophysica*, Cilt. 51, s. 315-331. DOI: 10.1007/s40328-015-0128-2.