ISSN: 2564-6761
Geomatik Dergisi
Journal of Geomatics
2018; 3(1);35-47

2016 Yılı 6 $M_w \geq 7.0$ Depremin İyonküre Değişimlerinin İncelenmesi

Erman ŞENTÜRK[1]*, Murat Selim ÇEPNİ[2]

[1]Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli
(erman.senturk@kocaeli.edu.tr) ORCID ID 0000-0002-0833-7113
[2]Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Kocaeli
(muratselim.cepni@kocaeli.edu.tr) ORCID ID 0000-0002-9349-6417

Öz

Çalışmada, orta enlem bölgesinde 2016 yılında meydana gelen magnitüdü 7'den büyük 6 depremin deprem öncesi, deprem günü ve deprem sonrası olmak üzere 15 günlük zaman aralığında iyonküre değişimleri CODE-GIM'den elde edilen deprem dış merkezine ait toplam elektron içeriği (TEİ) değerleri ile incelenmiştir. İyonkürede meydana gelen aykırılıkları ve anormal günleri belirlemek amacıyla çeyrek açıklık tabanlı kayan ortancalar yöntemi kullanılmıştır. 15 günlük dönemde elde edilen TEİ değerlerinden üst sınırı geçen, alt sınırın altında kalan zaman aralıkları sırasıyla pozitif ve negatif anormal gün olarak belirlenmiştir. Belirlenen anormal günlerdeki aykırılıkların sismik kaynaklı olduğu düşüncesini güçlendirmek amacıyla iyonküre uzay iklim koşullarını temsil eden Dst, Kp jeomanyetik ve F10.7 güneşsel indisleri ilgili zaman aralıklarında incelenmiştir. Hareketli ve sakin günler belirlenerek sakin günlere denk gelen aykırılıkların sismik kaynaklı olabileceği ön planda tutulmuştur. 6 depremin 5'inde deprem öncesi aykırılıklara rastlanmıştır. İlgili günlerdeki iyonküre uzay iklim koşullarının sakin olmasında dolayı, belirlenen aykırılıklardan günlük zaman diliminin 1/4'ünü kapsayanlarının sismik kaynaklı olabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: *Deprem, Deprem Öncülü, İyonküre, Toplam Elektron İçeriği*

Investigation of Ionosphere Variation the 6 $M_w \geq 7.0$ Earthquakes in 2016

Abstract

In the study, the ionospheric anomalies were investigated by total electron content (TEI) of the epicenter obtained from CODE-GIM in mid-latitude for six earthquakes occurred in 2016 that are greater than magnitude 7 with the period of 15 pre-earthquake, earthquake and after the earthquake days. Quartile-based sliding medians method was used to detect the anomalies and the abnormal days in the ionosphere. Time intervals above the upper bound, below the lower bound of the TEI values obtained during the 15-day period were determined as positive and negative abnormal days, respectively. The determined abnormal days were examined with the Dst, Kp geomagnetic and F10.7 solar effect indices representing the ionospheric space weather factors to substantiate the idea of the anomalies were originating from seismo-ionospheric coupling. Estimating the disturbed and quietest days, the anomalies correspond to quietest days were thought to be originating from seismic source. The pre-earthquake anomalies were detected five in six earthquakes. Due to the quietest of the ionospheric space weather conditions in the days concerned, the result of the determined irregularities is that the ones covering 1/4 of the daily period could be seismically sourced.

Keywords: *Earthquake, Earthquake Precursor, Ionosphere, Total Electron Content*

* Sorumlu Yazar

Geliş Tarihi:27.07.2017
Kabul Tarihi:14.09.2017

Geomatik Dergisi
Journal of Geomatics

2018; 3(1);35-47

1. GİRİŞ

Güçlü depremlerin, güneş patlamalarının ve manyetik fırtınaların iyonkürede beklenmedik değişimlere neden olduğu birçok çalışmada belirtilmiştir. Bu çalışmalarda yer merkezli iyonosonda verileri (Tsolis ve Xenos, 2010; Xu ve diğ., 2011), DEMETER uydu verileri (Sarkar ve Gwal, 2010), GPS verileri (Afraimovich ve diğ., 2004; Zakharenkova ve diğ., 2008; Liu ve diğ., 2004, 2009; Pulinets ve diğ., 2010, Le ve diğ., 2011) ve diğer bazı teknikler (Hsiao ve diğ., 2010, Ouzonov ve diğ., 2011) kullanılmıştır. İyonküre-deprem ilişkisiyle ilgili ilk çalışmalar 1964 Alaska depreminin incelenmesiyle başlamıştır (Davies ve Baker, 1965; Leonard ve Barnes, 1965). Deprem öncesi iyonkürede meydana gelen değişimlerin incelendiği diğer çalışmalarla konu önem kazanmıştır (Weaver ve diğ., 1970; Antsilevich, 1971; Datchenko ve diğ., 1972). İlk çalışmalarda kullanılan veriler çeşitli yer merkezli iyonosondalardan elde edilmiştir. Uydu verilerine dayalı çalışmalara 1980'lerde başlanmıştır (Gokhberg, 1983) ve ilk kez 17 Ocak 1994, M_w 6.7 Northridge depreminde iyonküre-deprem çalışmalarında GPS teknolojisi kullanılmıştır (Calais ve Minster, 1995).

Özellikle son yirmi yılda iyonküre-deprem çalışmaları gelişen teknoloji ve ölçme yöntemlerindeki çeşitlilik ve kalitenin artmasıyla hız kazanmıştır. Liu ve diğ., (2004), 1999-2002 yılları arasında Tayvan ve çevresinde gerçekleşmiş 20 M ≥ 6 depremi GPS-TEİ verileriyle 15 Günlük Kayan Ortanca ve Çeyrekler Açıklığı yöntemlerini kullanarak incelemişlerdir. 20 depremden 16'sında, depremden yaklaşık 5 gün öncesinde iyonkürede değişime rastlanmıştır. Buna göre başarı oranı %80'dir. Sonuç olarak GPS-TEİ verilerinin büyük depremlerde deprem öncesi iyonküre değişimlerini algılamada başarılı olduğu belirtilmiştir. Liu ve diğ., (2006), 1994-1999 yılları arasında Tayvan'da gerçekleşen 184 adet M=5+ depremini, Chung-Li iyonosonda istasyonundan elde ettikleri f_0F2 iyonosonda verileriyle incelemişlerdir. Çalışmada çeyrek açıklık yöntemi kullanılarak 184 depremden 1-5 gün öncesinde iyonkürede 307 olası deprem ilişkili aykırılığa rastlanmıştır. Ayrıca deprem magnitüd değeri yükseldikçe ve deprem dış merkezine olan yakınlık arttıkça aykırılık görülme sıklığının artmakta olduğu gözlenmiş ve depremle ilgili iyonküre değişimlerinin enerji ilişkili olduğu belirtilmiştir. Doğan ve diğ., (2011), 17 Ağustos 1999 İzmit depremini MAGNET ağına ait 4 istasyondan (TUBI, DUMT, MERT, KANT) elde ettikleri GPS-TEİ verileriyle incelemiş ve depremden 3 gün öncesinde TUBİ, MERT VE KANT istasyonlarında 8-10 TECU değerinde negatif aykırılık yakalamışlardır. İlgili günün jeomanyetik açıdan sakin güne denk gelmesi nedeniyle bu aykırılık İzmit depremiyle ilişkilendirilmiştir. Ouzounov ve diğ., (2011), 11 Mart 2011 tarihli M_w 9.0 Tohoku, Japonya depremini OLR (outgoing long wave radiation), GPS/TEİ, LEOIT (lower Earth orbit ionospheric tomography) ve Iyonosonda (f_0F2 critical frequency) yöntemlerini kullanarak incelemiş ve 4 yöntemin hepsinde depremden 3 gün önce iyonkürede aykırılık belirlenmiştir. İlgili günün güneşsel ve jeomanyetik açıdan sakin güne denk gelmesi nedeniyle değişimin deprem kaynaklı olduğuna karar verilmiştir. Arıkan ve diğ., (2012), 23 Ekim 2011 M_w 7.2 Van depremini CORS-TR'ye ait GPS istasyonlarıyla simetrik Kullback-Leibler Uzaklığı yöntemiyle incelemişlerdir. Buna göre depremden 8-9 gün öncesinde iyonkürede deprem kaynaklı aykırılık tespit edilmiştir. Deprem etki alanı içerisindeki CORS-TR istasyonlarına deprem merkezine uzaklığına göre 5 farklı bölge tanımı yapılmış (150 km den 780+ km'ye) ve yakından uzağa doğru her bölgede azalarak devam eden iyonküre-deprem etkisi görülmüştür. Ulukavak ve Yalcinkaya (2010) orta enlem bölgesinde (32.128^0 K, 115.303^0 B) 2010 yılında meydana gelen M7.2 Baja Kaliforniya depremini 5 (SIO3,GOL2, QUIN, AMC2 ve DRAO) deprem bölgesine yakın ve 1 (GRAZ) deprem bölgesine uzak toplam 6 IGS istasyonundan elde ettikleri TEİ değerleriyle incelemişlerdir. Sonuçlar depremden 1-5 gün öncesinde sismik kaynaklı aykırılıkların var olduğuna işaret etmiştir.

İyonküre-deprem arasındaki fiziksel süreç halen tam olarak ispatlanamamış olsa bile en güçlü varsayım, aktif fay yakınındaki yer kabuğundan radon ve diğer gazların çıkışı ve bunların atmosfere doğru ilerleyerek iyonlaşmaya neden olmasıdır (Toutain ve Baubron, 1998). Artan radon salınımı atmosferde, su moleküllerinin iyonlara

bağlanmasıyla (yoğunlaşma) belirgin olmayan bir ısı salınımı (artan hava sıcaklığı) oluşturur. Bu hava sıcaklığındaki artış hava iletkenliğinde değişkenliğe yol açar (Pulinets ve diğ., 2006). Tüm bu zincirleme fiziksel sürecin sonucunda iyonküredeki elektron yoğunluğunda pozitif ya da negatif yönlü değişim meydana gelir. Deprem dışında iyonküre, gezici iyonosferik bozucu etki, güneş, manyetik fırtına ve mevsimsel değişimlerden anlık ya da dönemsel olarak etkilemektedir. İyonküre-deprem arasında anlamlı bir ilişki kurulabilmesi için diğer tüm bu etkilerin eksiksiz modellendirilmesi gerekmektedir. Örneğin; gezici iyonosferik bozucu etki ve iyonküre kabarcığı gibi kısa süreli iyonküre değişimine neden olan bazı fiziksel olayları iyonküre-deprem etkisinden ayırmak için iyonküredeki değişiminin en az 4-6 saat süreyle sürekli olması beklenmelidir (Pulinets ve diğ., 2004). Yine jeomanyetik ve güneşsel aktivitenin yüksek olduğu günlerde TEİ değerlerinde tespit edilen değişimlerin kesin olarak deprem ile ilişkisini kurmak tartışmaya açık bir yaklaşım olacaktır.

Çalışmada orta enlem bölgesinde 2016 yılında meydana gelen 6 depremin ($M_w \geq 7.0$) CODE-GIM (CODE's Global Ionosphere Maps) ile elde edilen deprem dış merkezi TEİ değerleriyle iyonküre değişimleri zamansal olarak incelenmiştir. Bu amaçla çeyrek açıklık tabanlı kayan ortancalar yöntemi uygulanmıştır. İlgili değişimlerin sismik aktiviteyle ilişkisini kurabilmek için Dst, Kp jeomanyetik ve F10.7 güneşsel indisleri incelenen zaman aralıklarında elde edilerek iyonküre uzay iklim koşulları dikkate alınmıştır. Çalışmadaki istatistiksel analizler ve grafikler MATLAB® ortamında yazılan fonksiyonlar kullanılarak hazırlanmıştır.

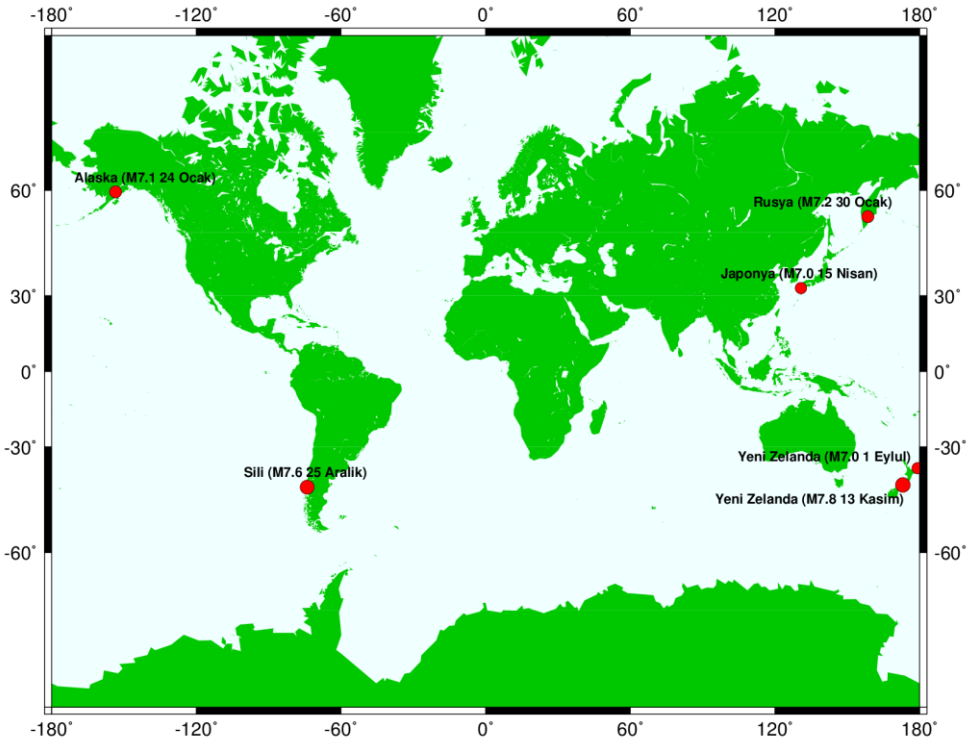
2. VERİ VE YÖNTEM

İyonosfer bilimsel çalışmalarda temel alınmak üzere 3 bölgeye ayrılmıştır: düşük enlem bölgesi (0^0-30^0 coğrafi kuzey ve güney enlemleri), orta enlem bölgesi (30^0-60^0 coğrafi kuzey ve güney enlemleri) ve yüksek enlem bölgesi (60^0-90^0 coğrafi kuzey ve güney enlemleri). Ayrıca her bölgenin kendine özgü karakteristiği bulunmaktadır ve çalışmalarda çoğu zaman bölgeler ayrı olarak ele alınmaktadır. 2016 yılında orta enlem bölgesinde meydana gelen 6 deprem ($M_w \geq 7.0$), olası deprem öncüllerinin belirlenmesi amacıyla çalışma kapsamında seçilmiştir. İlgili depremlerin deprem parametreleri ve yerküre üzerindeki dağılışları Tablo 1 ve Şekil 1'de gösterilmektedir. Çalışma bölgelerinde meydana gelen depremlere ait veriler Amerika Birleşik Devletleri Jeolojik Araştırmalar (USGS: United States Geological Survey) web sitesinden elde edilmiştir (https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/).

Deprem dış merkezi TEİ, CODE (Center for Orbit Determination in Europe) tarafından 2 saat zamansal ve 2.5^0x5^0 ($\pm 87.5^0$ enlem - $\pm 180^0$ boylam, 5184 ızgara) konumsal çözünürlükte günlük yayınlanan IONEX dosyalarından, deprem dış merkezine en yakın 4 ızgara noktasında iki değişkenli (bivariate) enterpolasyon yöntemi ile hesaplanmıştır (Schaer ve diğ., 1998). IONEX dosyaları ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/gps/products/ionex/ adresinden elde edilmiştir. TEİ değeri TECU biriminde ifade edilmekte ve 1 TECU 10^{16} elektron/m^2'ye karşılık gelmektedir (Ciraolo ve diğ., 2007).

Tablo 1. Çalışma kapsamında ele alınan depremlerin fiziksel parametreleri

Deprem Zamanı (UTC)	Dış Merkez Koordinatları	Magnitüd (M)	Derinlik (km)
24-01-2016 10:30:30	59.636°K 153.405°B	7.1	129.0
30-01-2016 03:25:12	53.978°K 158.546°D	7.2	177.0
15-04-2016 16:25:06	32.791°K 130.754°D	7.0	10.0
01-09-2016 16:37:57	37.359°G 179.146°D	7.0	19.0
13-11-2016 11:02:56	42.737°G 173.054°D	7.8	15.1
25-12-2016 14:22:27	43.406°G 73.944°B	7.6	38.0



Şekil 1: Depremlerin dış merkezleri

15 günlük zaman diliminde (10 gün deprem öncesi, deprem günü ve 4 gün deprem sonrası) TEİ de meydana gelen aykırılıkları tespit etmek için çeyrek açıklık tabanlı kayan ortancalar yöntemi kullanılmıştır. Bu yönteme göre TEİ değerlerinin her epokta 15 gün önceki aynı epoğa denk gelen değerlerinin ortanca (μ) ve standart sapma (σ) değerleri hesaplanmıştır. TEİ değerlerinin ortalaması $\bar{m}$ ve standart sapması σ olacak şekilde normal dağılımda olduğu varsayılmıştır. Olası aykırılıkları belirlemek için 15 günlük TEİ değerlerinin alt çeyrek (LQ) ve üst çeyrek (UQ) değerleri belirlenmiştir. Ayrıca bu değerlere bağlı olarak üst sınır, μ+1.5(UQ-μ) ve alt sınır, μ-1.5(μ-LQ) değerleri hesaplanmıştır. Buna göre belirli bir epokta gözlemlenen TEİ değerinin üst sınır değerleri aşması veya alt sınır değerleri aşmaması durumunda ilgili epok sırasıyla pozitif veya negatif aykırılık olarak tanımlanmıştır. Gözlemlenen TEİ değerinin üst ve alt sınır içerisinde kalması durumunda ilgili epokta iyonkürede herhangi anormal durum söz konusu olmadığına karar verilmiştir. 15 günlük TEİ değişiminde aykırılıklar incelenirken ilgili depremden 15 gün önce ve sonra bölgede başka bir büyük deprem ($M_w \geq 6$) olup olmadığı elde edilen sonuçların bir başka sismik aktivite kaynaklı oluşamayacağını ispatlamak amacıyla dikkate alınmıştır. Daha önceki bölümde, iyonkürede meydana gelen kısa süreli değişimleri sismik etkiden ayırmak için TEİ'de gözlemlenen değişimlerin en az 4-6 saat sürekli olması gerektiği belirtilmiştir. Buna nedenle çalışmada 6 saatten daha kısa süreli (3/12) aykırılıklar TEİ değişiminden çıkarılmıştır.

Ayrıca iyonküreyi önemli ölçüde etkileyen iyonküre uzay iklim koşullarını belirlemek için Dst, Kp jeomanyetik ve F10.7 güneşsel indisleri https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ den elde edilmiştir. Dst indisi, 4 gözlem istasyonundan alçak enlem manyetogramları kullanılarak, 1 saatlik aralıklarla elde edilen, manyetik fırtınayı, derecesini ve iyonküre tabakasındaki değişimleri gösteren indistir. İndis manyetik alanın yatay düzlemdeki bileşeninin ekvatordaki azalmasını ifade etmektedir. Dst değerindeki azalma jeomanyetik fırtına şiddetinin arttığını göstermektedir. Dst birimi nanoTesla (nT)'dır (Hunsucker ve Hargreaves, 2003). Kp indisi, orta enlem bölgesinde bulunan 13 istasyondan, 3 saat zamansal çözünürlükte 1932 yılından beri çeşitli kurumlar tarafından üretilmektedir. İndisin hesaplanmasında tek bir gözlem merkezinin sakin gün olarak kabul edildiği zamana ait ölçümler referans alınır. Kp indisi güneşin manyetik alan etkisi ile parçacık yayılımını ölçmekte ve manyetik alan

farklılıklarına göre 0-9 arasında değerler almaktadır (Menvielle, 2001). F10.7 indisi 2800 MHz frekanslı 10.7 cm dalga boyundaki güneş radyo akışını tanımlamaktadır. F10.7 indisinin birimi solar akıdır (sfu) ve 1 sfu=$10^{-22}$$Wm^{-2}Hz^{-1}$ (Tapping, 2013). Tablo 2'de jeomanyetik fırtına seviyeleri gösterilmektedir. Çalışmada jeomanyetik aktiviteli günler Kp ≥ 4 ve |Dst| ≥ 20 koşullarının aynı anda sağlandığı günler olarak belirlenmiştir. Ayrıca güneşsel etki incelenirken F10.7'nin zamansal değişimi dikkate alınmış ve indiste meydana gelen ani değişimler göz önüne alınmıştır.

Tablo 2. Jeomanyetik fırtına seviyeleri

Manyetik fırtınanın derecesi	Kp indisi	Dst indisi (nT)
G1 Küçük	K=5	Dst>-20
G2 Orta	K=6	-20>Dst>-50
G3 Kuvvetli	K=7	-50>Dst>-100
G4 Ağır	K=8	-100>Dst>-250
G5 Aşırı	K=9	-300>Dst

3. SAYISAL UYGULAMALAR

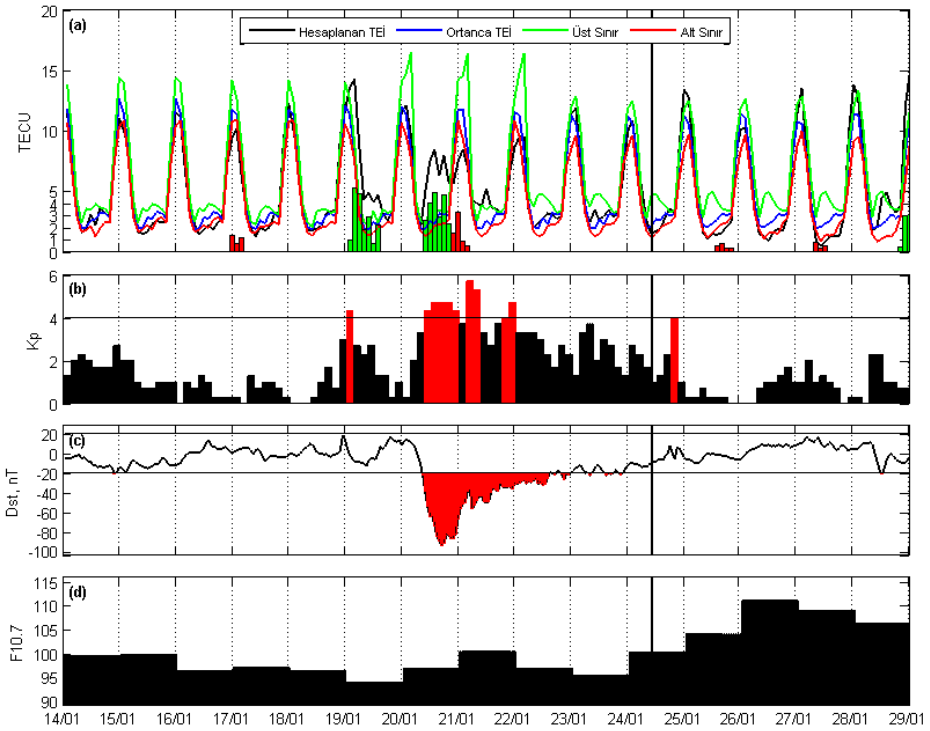
Çalışmada kullanılan tüm depremler için deprem öncesi 10 gün, deprem günü ve depremden sonraki 4 günü kapsayan 15 günlük bir aralıkta deprem anomalileri incelenmiştir. Ayrıca kullanılan tüm zaman birimleri Eş Güdümlü Evrensel Zaman (UTC - Coordinated Universal Time)'a göredir. İncelenen depremlerin iyonosferik değişimlerine başka bir depremin etki etmediğini kanıtlamak amacıyla tüm depremlerde, depremden 15 gün önce ve sonrasında depremin yakın çevresinde başka bir büyük depremin meydana gelip gelmediği ayrıca incelenmiştir.

3.1. M_w 7.1 Alaska depremi, 24 Ocak 2016

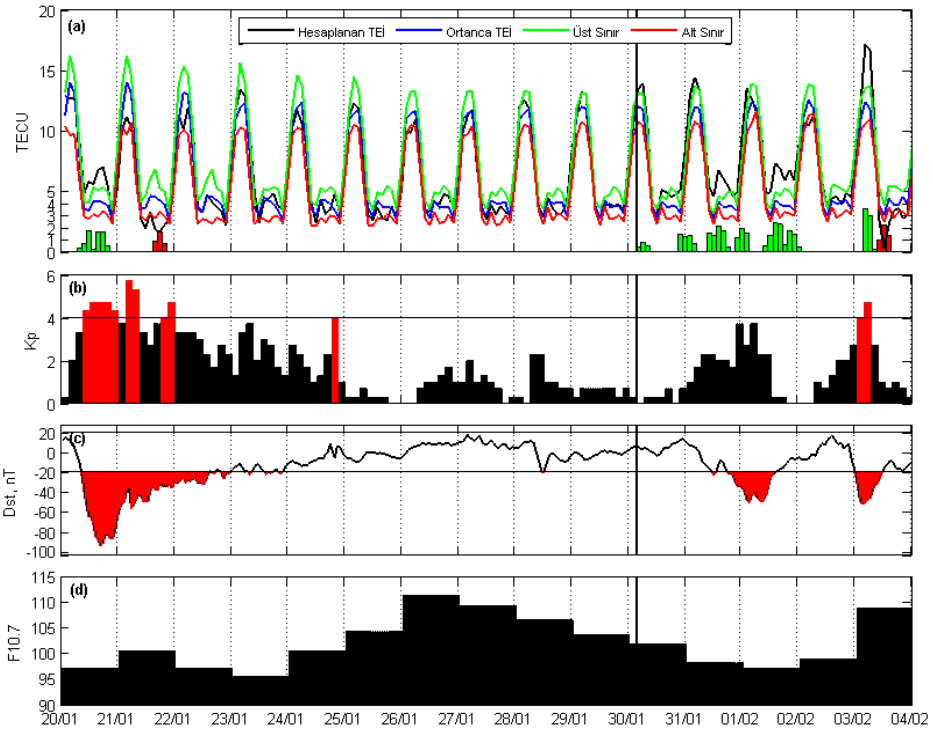
Deprem saat 10:30'da 129 km derinlikte meydana gelmiştir. Alaska depreminden 15 gün önce ve sonra bölgedeki sismik durum incelendiğinde M ≥ 6 depreme rastlanmamıştır. Şekil 2'ye göre 20-21 Ocak tarihlerinde jeomanyetik aktivite belirlenmiştir. Güneş etkisi incelendiğinde F10.7 değerlerinin 95-110 SFU arasında olduğu ve sakin bir değişim gösterdiği görülmektedir. Alaska depreminin TEİ değişimi incelendiğinde depremden 7 gün önce ~1-2 TECU negatif, 4-5 gün önce ~5 TECU pozitif, 3 gün önce ~3 TECU negatif aykırılık görülmektedir. Ayrıca depremden 1 gün sonra ~1 TECU negatif, 3 gün sonra ~1 TECU negatif ve 4 gün sonra ~3 TECU pozitif aykırılığa rastlanmıştır.

3.2. M_w 7.2 Rusya depremi, 30 Ocak 2016

Deprem saat 03:25'de 177 km derinlikte meydana gelmiştir. Rusya depreminden 15 gün önce ve sonra bölgedeki sismik durum incelendiğinde M ≥ 6 depreme rastlanmamıştır. Şekil 3'e göre 20-21 Ocak ve 3 Şubat tarihlerinde jeomanyetik aktivite belirlenmiştir. F10.7 değerlerinin 95-110 SFU arasında olduğu ve sakin bir değişim gösterdiği görülmektedir. Rusya depreminin TEİ değişimi incelendiğinde depremden 10 gün önce ~2 TECU pozitif, 9 gün önce ~2 TECU negatif aykırılık görülmektedir. Ayrıca deprem günü ile depremden 1-2 gün sonra ~1-2 TECU pozitif, 4 gün sonra ~3 TECU pozitif, ~2 TECU negatif aykırılığa rastlanmıştır.



Şekil 2: 24 Ocak 2016 M_w7.1 Alaska depremi TEİ, Kp, Dst ve F10.7 değerlerinin değişimi. Siyah dik çizgiler deprem anını temsil etmektedir. a) TEİ değişimi; siyah, mavi, yeşil ve kırmızı çizgiler sırasıyla hesaplanan TEİ, ortanca TEİ, üst sınır ve alt sınırı gösterir. Yeşil ve kırmızı barlar sırasıyla pozitif ve negatif aykırılıkları gösterir. b) Kp değişimi; siyah ve kırmızı çubuklar sırasıyla sakin ve hareketli jeomanyetik durumları gösterir. c) Dst değişimi; kırmızı alanlar hareketli jeomanyetik durumları gösterir. d) F10.7 değişimi.



Şekil 3: 30 Ocak 2016 M_w 7.2 Rusya depremi; Şekil 2'nin aynısı.

3.3. M_w 7.0 Japonya depremi, 15 Nisan 2016

Deprem saat 16:25'de 10 km derinlikte meydana gelmiştir. Japonya depreminden 15 gün önce ve sonra bölgedeki sismik durum incelendiğinde M_w 6.0 ve M_w 6.2 Japonya depremlerinin olduğu görülmektedir. Bu depremler M_w7.0 Japonya depremine oldukça yakın bir konumda (~10km) meydana gelmiştir. Şekil 4'e göre 7-8, 12-15 ve 17 Nisan tarihlerinde jeomanyetik aktivite belirlenmiştir. F10.7 değerlerinin 80-110 SFU arasında olduğu ve sakin bir değişim gösterdiği görülmektedir. Japonya depreminin TEİ değişimi incelendiğinde depremden 9 gün önce ~5 TECU pozitif, 1-3 gün önce ~3 TECU pozitif aykırılık görülmektedir. Ayrıca deprem günü ~6 TECU negatif, depremden 1 gün sonra ~5 TECU pozitif, ~2 TECU negatif ve 4 gün sonra ~4 TECU negatif aykırılığa rastlanmıştır.

3.4. M_w 7.0 Yeni Zelanda depremi, 1 Eylül 2016

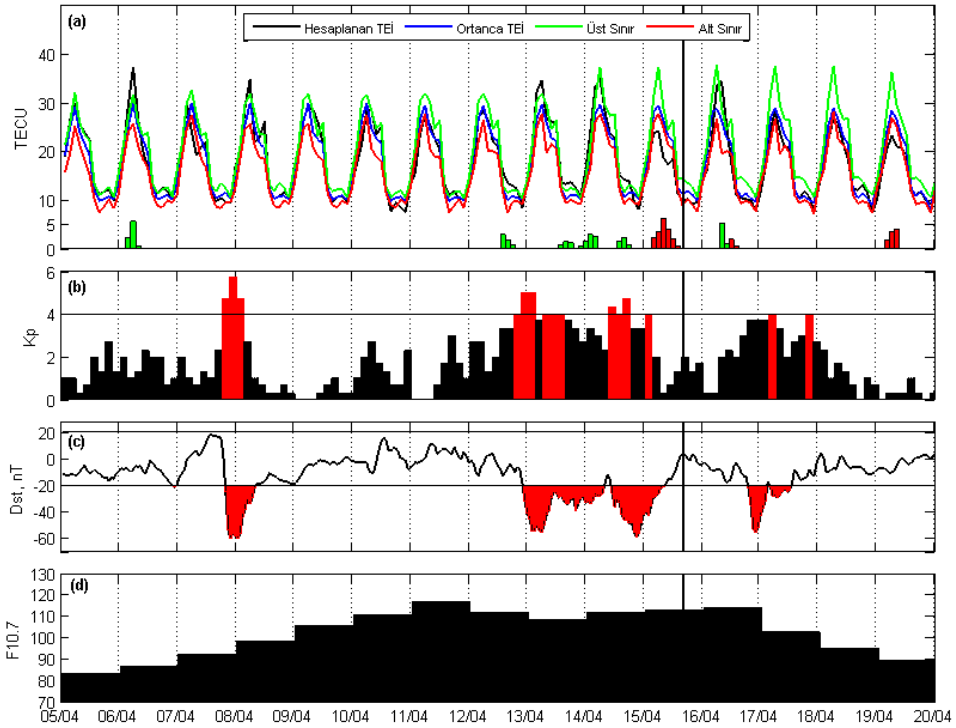
Deprem saat 16:38'de 19 km derinlikte meydana gelmiştir. Yeni Zelanda depreminden 15 gün önce ve sonra bölgedeki sismik durum incelendiğinde M_w 6.1 Yeni Zelanda depremi olduğu görülmektedir. Bu deprem M_w 7.0 Yeni Zelanda depremine oldukça yakın bir konumda (~10km) meydana gelmiştir. Şekil 5'e göre 23-24, 30 Ağustos ve 1-5 Eylül tarihlerinde jeomanyetik aktivite belirlenmiştir. F10.7 değerlerinin 80-100 SFU arasında olduğu ve sakin bir değişim gösterdiği görülmektedir. Yeni Zelanda depreminin TEİ değişimi incelendiğinde depremden 4-6 gün önce ~1-2 TECU negatif, 1 gün önce ~2 TECU pozitif aykırılık görülmektedir. Ayrıca depremden 1 gün sonra ~5 TECU pozitif aykırılığa rastlanmıştır.

3.5. M_w 7.8 Yeni Zelanda depremi, 13 Kasım 2016

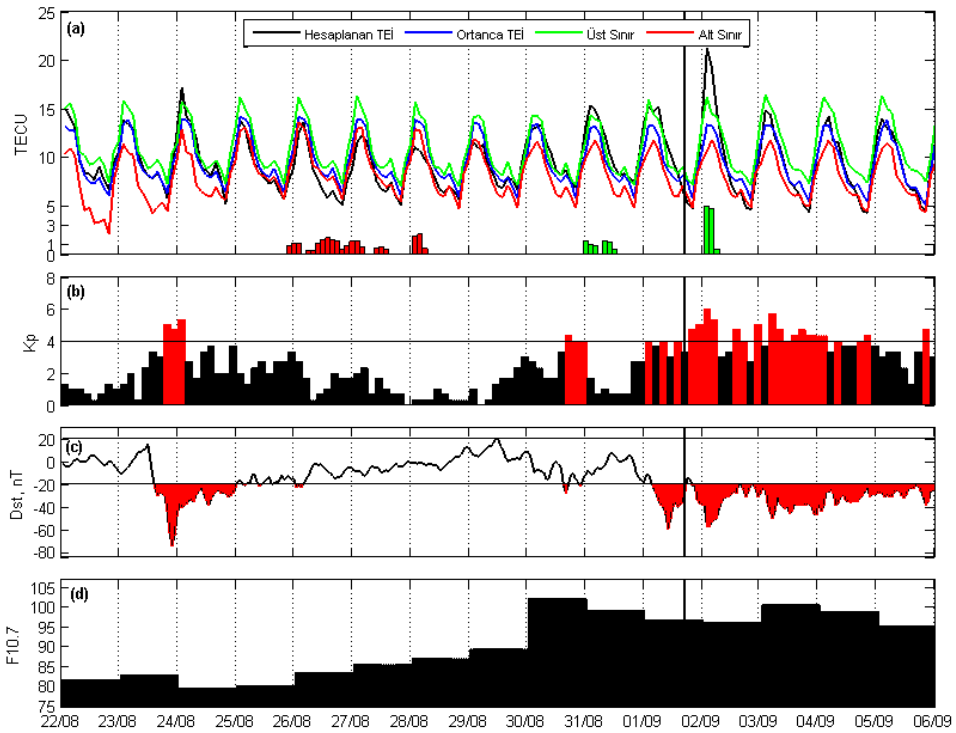
Deprem saat 11:03'de 15.1 km derinlikte meydana gelmiştir. Yeni Zelanda depreminden 15 gün önce ve sonra bölgedeki sismik durum incelendiğinde M_w 6.1, M_w 6.2 ve 2 adet M_w 6.5 Yeni Zelanda depremleri olduğu görülmektedir. Bu depremler M_w 7.8 Yeni Zelanda depremine oldukça yakın bir konumda (~10-50km) meydana gelmiştir. Şekil 6'e göre 3, 10-13 Kasım tarihlerinde jeomanyetik aktivite belirlenmiştir. F10.7 değerlerinin 75-80 SFU arasında olduğu ve oldukça sakin bir değişim gösterdiği görülmektedir. Yeni Zelanda depreminin TEİ değişimi incelendiğinde depremden 1-4 gün önce ~1-3 TECU pozitif aykırılık, 6-9 gün önce ~1-2 TECU pozitif aykırılık görülmektedir. Ayrıca deprem günü ~1 TECU pozitif, ~2 TECU negatif, depremden 1-2 gün sonra ~1-2 TECU negatif aykırılığa rastlanmıştır.

3.6. M_w 7.6 Şili depremi, 25 Aralık 2016

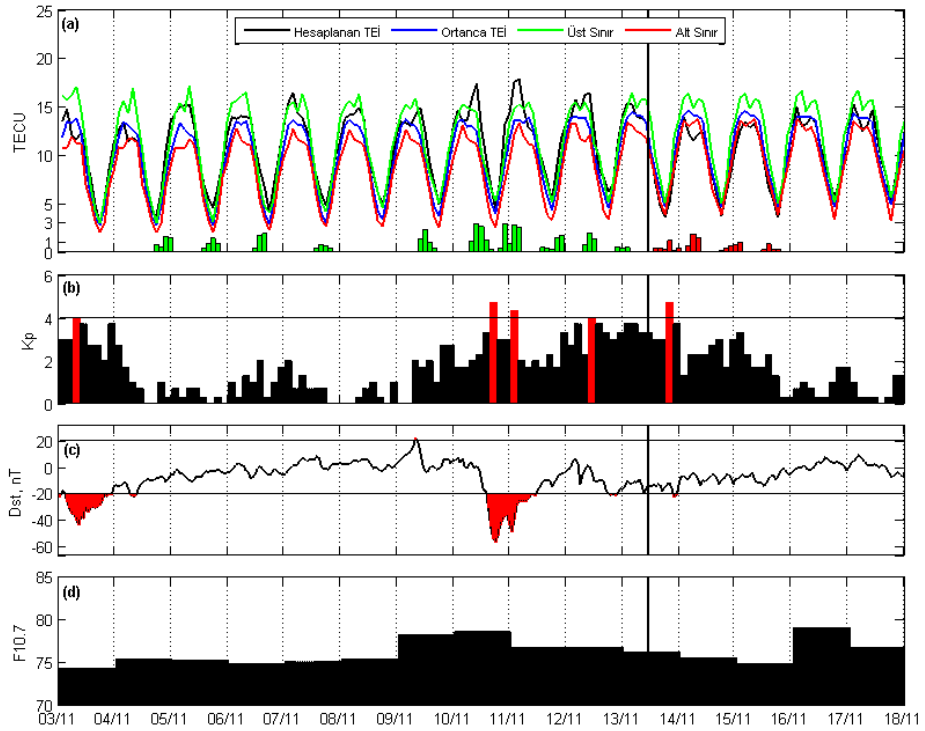
Deprem saat 14:22'de 38 km derinlikte meydana gelmiştir. Şili depreminden 15 gün önce ve sonra bölgedeki sismik durum incelendiğinde M≥6 depreme rastlanmamıştır. Şekil 7'e göre 21-23, 25-26 Aralık tarihlerinde jeomanyetik aktivite belirlenmiştir. Güneş etkisi incelendiğinde F10.7 değerlerinin 70-73 SFU arasında olduğu ve oldukça sakin bir değişim gösterdiği görülmektedir. Şili depreminin TEİ değişimi incelendiğinde depremden 4 gün önce ~15 TECU pozitif, 6-10 gün önce ~3-6 TECU negatif aykırılık görülmektedir.



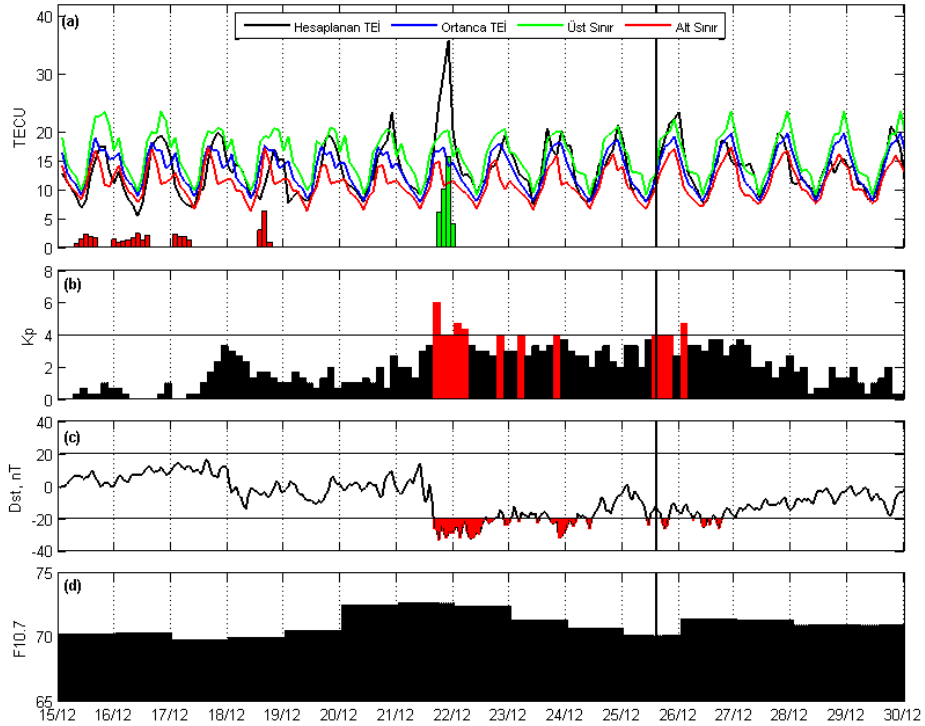
Şekil 4: 15 Nisan 2016 M_w 7.0 Japonya depremi; Şekil 2'nin aynısı.



Şekil 5: 1 Eylül 2016 M_w 7.0 Yeni Zelanda depremi; Şekil 2'nin aynısı.



Şekil 6: 13 Kasım 2016 M_w 7.8 Yeni Zelanda depremi; Şekil 2'nin aynısı.



Şekil 7: 25 Aralık 2016 M_w 7.6 Şili depremi; Şekil 2'nin aynısı.

Çalışmada ele alınan 6 depremin TEİ değişimleri yardımıyla belirlenen anormal günler ve ilgili günlerdeki iyonküre uzay iklim koşulları Tablo 3'de gösterilmektedir. Jeomanyetik aktiviteli günler Kp ≥ 4 ve |Dst| ≥ 20 koşullarının aynı anda sağlandığı günler olarak belirlenmiştir.

Tablo 3. Deprem öncesi, deprem günü ve sonrası anormal ve aktif jeomanyetik günler. x, anormal günü; *, jeomanyetik aktivite gününü; kırmızı x ise jeomanyetik aktiviteye denk gelen anormal günü temsil etmektedir. Deprem günlerinde -, deprem öncesi günü; 0, deprem gününü; +, deprem sonrası günü ve ilgili sayılarda aktivite gününün deprem günü referans alınarak kaçıncı güne denk geldiğini göstermektedir.

	Deprem günleri														
	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4
M_w=7.1 Alaska				x		x	x	x				x		x	x
							*	*							
M_w=7.2 Rusya	x	x									x	x	x		x
	*	*													*
M_w=7.0 Japonya		x						x	x	x	x	x			x
			*	*				*	*	*	*		*		
M_w=7.0 Yeni Zelanda					x	x	x			x		x			
		*	*						*		*	*	*	*	*
M_w=7.8 Yeni Zelanda		x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x		
	*							*	*	*	*				
M_w=7.6 Şili	x	x	x	x			x								
							*	*	*		*	*			

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışma, 2016 yılında orta enlem bölgesinde meydana gelen $M_w \geq 7.0$ olan 6 depremin iyonküre ile ilişkili sismik, güneşsel ve jeomanyetik durumunu göstermektedir. CODE tarafında üretilen Küresel İyonosfer Haritaları'ndan elde edilen deprem dış merkezi TEİ değerleri 15 günlük çeyrek açıklık tabanlı kayan pencere yöntemine göre incelenerek aykırılıklar ve bununla ilişkili anormal günler belirlenmiştir. Tespit edilen aykırılıkların sismik aktivite kaynaklı olduğu varsayımını güçlendirmek için Dst, Kp jeomanyetik ve F10.7 güneş etkisi indisleri dikkate alınmıştır. Buna bağlı jeomanyetik ve güneşsel aktivitenin hareketli olduğu günler belirlenmiştir.

İncelenen 6 depremden sadece 177 km derinlikte meydana gelen M_w 7.2 Rusya depreminde deprem öncesi iyonküre değişimine rastlanmamıştır. Yine 129 km derinlikte meydana gelen M_w 7.1 Alaska depreminde de belirgin bir değişim görülmemektedir. 19 Ocak 2016 günü meydana gelen ~5 TECU luk değişim 00:00 - 03:00 UTC saatlerinde Kp = 4 olmasından dolayı şüphelidir. Daha önce magnitüd değeri yüksek ($M \geq 7.0$) ve sığ ($\leq$ 20 km) depremlerde iyonküredeki sismik etkinin daha belirgin ortaya çıktığı bazı çalışmalarda belirtilmiştir (Le ve diğ., 2011). Ayrıca Xia ve diğ. (2011)'de depremin odak derinliğinin iyonküre değişiminde deprem magnitüdüne göre daha belirleyici olduğundan bahsedilmektedir. Çalışmada diğer 4 sığ (10km-38km) depreme göre (M_w 7.0 Japonya hariç) nispeten orta derinlikli (>100km) Alaska ve Rusya depremlerinde deprem öncesi daha az anormal gün görülmekte ve bu durum önceki çalışma sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Deprem magnitüdleri dikkate alındığında M_w 7.8 Yeni Zelanda ve M_w 7.6 Şili depremlerinde deprem öncesi anormal günlerin sayısının daha fazla olduğu görülmektedir. 6 depremde deprem öncesi 10 gün için 27 anormal gün (27/60), deprem günü

3 anormal gün (3/6) ve deprem sonrası 4 günde 11 anormal gün (11/24) belirlenmiştir. Anormal günler incelendiğinde deprem öncesi ve sonrası için özel bir aralık belirlemek mümkün değildir. Aykırılık durumu incelendiğinde yine pozitif ve negatif aykırılıklara göre özel bir durum belirlemek olanaksızdır. Bazı depremlerde pozitif (M_w 7.1 Alaska, M_w 7.2 Rusya, M_w 7.0 Japonya, M_w 7.8 Yeni Zelanda), bazılarında ise negatif (M_w 7.0 Yeni Zelanda, M_w 7.6 Şili) aykırılık daha sık görülmüştür.

Çalışmadaki yöntem ve seçimlerin iyonküre-deprem ilişkisini ortaya çıkarmadaki başarısı çeşitli kısıtlamalara bağlıdır. Örneğin, TEİ'de 15 günlük değişimin incelenmesi, 6 saatten kısa süreli değişimlerin göz ardı edilmesi, jeomanyetik aktiviteli günlerin seçiminde Dst, Kp indisleri için belirlenen sınır değerler vb. bazı varsayımlar tamamen deneysel ve istatistiksel çalışmaların sonucu olarak tanımlanmıştır (Forbes ve diğ., 2000; Liu ve diğ., 2006; Pulinets ve diğ., 2003). İyonküre-deprem ilişkisi arasındaki fiziksel model çeşitli yaklaşımlarla, örneğin; elektrik alan (Sorokin ve diğ., 2006; Pulinets, 2009), akustik ve gravite dalgaları (Rozhnoi ve diğ., 2007; Kaladze ve diğ., 2008; Klimenko ve diğ., 2011), elektromanyetik (Hayakawa ve Fujinawa, 1994; Hayakawa ve Molchanov, 2002) vb. açıklanmaya çalışılsa da, daha tam olarak kabul görmüş ya da ispatlanmış bir teori bulunmamaktadır. Bunun yanında konu çeşitli istatistiksel çalışmalarla desteklenmektedir (Hayakawa ve diğ., 2010; Le ve diğ., 2011; Liu ve diğ., 2006, 2010; Parrot, 2012). Bu çalışmalarda deprem parametreleri (magnitüdü, derinliği, zamanı, odak mekanizması, konumu vb.) ile iyonküre aykırılıkları arasında çeşitli ilişkiler ortaya koyulmaktadır. Bir deprem öncülü olarak iyonküredeki değişimler ancak özel bir zaman aralığında sınırları belirlenmiş şekilde ortaya çıkarılırsa anlamlı olacaktır. Bunun içinse öncelikle ve kesinlikle bu ilişki arasındaki fiziksel model tam anlamıyla ortaya koyulmalıdır. Daha sonra fiziksel modeli destekleyecek deneysel, istatistiksel çalışmalarla ve gelişen ölçme teknikleri ve hassasiyetleriyle deprem öncülü olarak iyonküre-deprem çalışmaları daha etkin bir çalışma alanı olacaktır.

KAYNAKÇA

Afraimovich, E.L., Astafieva, E.I., Gokhberg, M.B., Lapshin, V.M., Permyakova, V.E., Steblov, G.M., Shalimov, S.L. (2004). Variations of the total electron content in the ionosphere from variations of the total electron content in the ionosphere from GPS data recorded during the Hector Mine earthquake of October 16, 1999, California. Russian J. Earth Sci., 6(5), 339-354.

Antsilevich, M. G. (1971). The influence of Tashkent earthquake on the earth's magnetic field and the ionosphere, Tashkent earthquake 26 April 1966. FAN Publ., 187-188.

Arıkan, F., Deviren, M.N., Lenk, O., Sezen, U., Arıkan O. (2012). Observed Ionospheric Effects of 23 October 2011 Van, Turkey Earthquake. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 3(1), 1-8.

Calais, E., Minster, J.B. (1995). GPS detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake. Geophys. Res. Lett., 22(9), 1045-1048.

Ciraolo, L., Azpilicueta, F., Brunini, C., Meza, A., Radicella, S.M. (2007). Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS. J. Geod., 81(2), 111-120.

Datchenko, E.A., Ulomov, V.I., Chernyshova, C.P. (1972). Electron density anomalies as the possible precursor of Tashkent earthquake, Dokl. Uzbek. Acad. Sci., 12, 30-32.

Davies, K., Baker, D.M. (1965). Ionospheric effects observed around the time of the Alaskan earthquake of March 28, 1964. J. Geophys. Res., 70(9), 2251-2253.

Dogan, U., Ergintav, S., Skone, S., Arslan, N., Oz, D. (2011). Monitoring of the ionosphere TEC variations during the 17th August 1999 Izmit earthquake using GPS data. Earth Planets Space, 63(12), 1183-1192.

Forbes, J.M., Palo, S.E., Zhang, X. (2000). Variability of the ionosphere. J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 62(8), 685-693.

Gokhberg, M.B. (1983). Strong acoustic wave action. ESA Special Publication, 195, 99-110.

Hayakawa, M., Fujinawa, Y. (Eds.) (1994). Electromagnetic Phenomena Related to Earthquake Predication. Terra Sci. Pub. Co., Tokyo, 667.

Hayakawa, M., Molchanov, O.A. (Eds.) (2002). Seismo Electromagnetics: Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere Coupling. TERRAPUB, Tokyo, 477.

Hayakawa, M., Kasahara, Y., Nakamura, T., Muto, F., Horie, T., Maekawa, S., Hobara, Y., Rozhnoi, A.A., Solovieva, M., Molchanov, O.A. (2010). A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes. J. Geophys. Res., 115, A09305.

Hsiao, C.C., Liu, J.Y., Oyama, K.I., Yen, N.L., Liou, Y.A., Chen, S.S., Miau, J.J. (2010). Seismo-ionospheric precursor of the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake observed by FORMOSAT-3/COSMIC. GPS Solution, 14(1), 83-89.

Hunsucker R.D., Hargreaves J.K. (2003). The High-Latitude Ionosphere and Its Effects on Radio Propagation. Cambridge University Press, Cambridge.

Kaladze, T.D., Pokhotelov, O.A., Shah, H.A., Khan, M.I., Stenflo, L. (2008). Acoustic-gravity waves in the Earth's ionosphere. J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 70(13), 1607-1616.

Klimenko, M.V., Klimenko, V.V., Karpov, I.V., Zakharenkova, I.E. (2011). Modeling of seismoionospheric effects initiated by internal gravity waves. Russ. J. Phys. Chem., 30(5), 41-49.

Le, H., Liu, J.Y., Liu, L. (2011). A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+ earthquakes during 2002-2010. J. Geophys. Res. A: Space Phys., 116, A02303.

Leonard, R.S., Barnes, R.A. (1965). Observation of ionospheric disturbances following the Alaskan earthquake. J. Geophys. Res. 70(5), 1250-1253.

Liu Z., Gao Y. (2004). Ionospheric TEC predictions over a local area GPS reference network, GPS Solutions. 8(1), 23-29.

Liu, J.Y., Chuo, Y.J., Shan, S.J., Tsai, Y.B., Chen, Y.I., Pulinets, S.A., Yu, S.B. (2004). Pre-earthquake-ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements. Ann. Geophys., 22(5), 1585-1593.

Liu, J.Y., Chen, Y.I., Chuo, Y.J., Chen, C.S. (2006). A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly. J. Geophys. Res., 111, A05304.

Liu, J.Y., Chen, Y.I., Chen, C.H., Liu, C.Y., Chen, C.Y., Nishihashi, M., Li, J.Z., Xia, Y.Q., Oyama, K.I., Hattori, K., Lin, C.H. (2009). Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake. J. Geophys. Res., 114, A04320.

Liu, J.Y., Chen, C.H., Chen, Y.I., Yang, W.H., Oyama, K.I., Kuo, K.W. (2010). A statistical study of ionospheric earthquake precursors monitored by using equatorial ionization anomaly of GPS TEC in Taiwan during 2001-2007. J. Asian Earth Sci., 39(1), 76-80.

Menvielle M. (2001). The Geomagnetic Indices: Derivation, Meaning, and Availability, Space Weather Workshop: Looking Towards a Future European Space Weather Programme, Noordwijk, Netherlands, 17-19 September 2001.

Ouzounov, D., Pulinets, S., Romanov, A., Romanov, A., Tsybulya, K., Davidenko, D., Kafatos, M., Taylor, P. (2011). Atmosphere-ionosphere response to the M9 Tohoku earthquake revealed by multi instrument space-borne and ground observations: Preliminary results. Earthq Sci, 24(6), 557-564.

Parrot, M. (2012). Statistical analysis of automatically detected ion density variations recorded by DEMETER and their relation to seismic activity. Ann. Geophys., 55(1), 149-155.

Pulinets, S.A., Legen'Ka, A.D., Gaivoronskaya, T.V., Depuev, V.K. (2003). Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes. J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 65(16), 1337-1347.

Pulinets, S.A., Boyarchuk, K.A. (2004). Ionospheric precursors of earthquakes, Springer, Berlin.

Pulinets, S.A., Ouzounov, D., Karelin, A.V., Boyarchuk, K.A., Pokhmelnykh, L.A. (2006). The physical nature of thermal anomalies observed before strong earthquakes. Phys. Chem. Earth., 31(4), 143-153.

Pulinets, S.A. (2009). Physical mechanism of the vertical electric field generation over active tectonic fault. Adv. Space Res., 44(6), 767-773.

Pulinets, S.A., Bondur, V.G., Tsidilina, M.N., Gaponova, M.V. (2010). Verification of the concept of seismoionospheric coupling under quiet heliogeomagnetic conditions, using the Wenchuan (China) earthquake of May 12, 2008, as an example. Geomagn. Aeron., 50(2), 231-242.

Rozhnoi, A., Solovieva, M., Molchanov, O., Biagi, P.F., Hayakawa, M. (2007). Observation evidences of atmospheric Gravity Waves induced by seismic activity from analysis of subionospheric LF signal spectra. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7(5), 625-628.

Sarkar, S., Gwal, A.K. (2010). Satellite monitoring of anomalous effects in the ionosphere related to the great Wenchuan earthquake of May 12, 2008. Nat. Hazards, 55(2), 321-332.

Schaer, S., Gurtner, W., Feltens, J. (1998). IONEX: The ionosphere map exchange format version 1. In Proceedings of the IGS AC workshop, Darmstadt, Germany (Vol. 9, No. 11).

Sorokin, V.M., Chmyrev, V.M., Yaschenko, A.K. (2006). Possible DC electric field in the ionosphere related to seismicity. Adv. Space Res., 37(4), 666-670.

Tapping, K. F. (2013). The 10.7 cm solar radio flux (F10. 7). Space Weather, 11(7), 394-406.

Toutain, J.P., Baubron, J.C. (1998). Gas geochemistry and seismotectonics: A review. Tectonophysics, 304(1), 1-27.

Tsolis, G.S., Xenos, T.D. (2010). A qualitative study of the seismo-ionospheric precursor prior to the 6 April 2009 earthquake in L'Aquila, Italy. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10(1), 133-137.

Ulukavak, M., Yalcinkaya, M. (2016). Precursor analysis of ionospheric GPS-TEC variations before the 2010 M 7.2 Baja California earthquake. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 1-14.

Weaver, P.F., Yuen, P.C., Prolss, G.W., Furumoto, A.S. (1970). Acoustic coupling into the ionosphere from seismic waves of the earthquake at Kurile Islands on August 11, 1969. Nature, 226(5252), 1239-1241.

Xia, C., Yang, S., Xu, G., Zhao, B., Yu, T. (2011). Ionospheric anomalies observed by GPS TEC prior to the Qinghai-Tibet region earthquakes. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 22(2), 177-185.

Xu, T., Hu, Y., Wu, J., Wu, Z., Li, C., Xu, Z., Suo, Y. (2011). Anomalous enhancement of electric field derived from ionosonde data before the great Wenchuan earthquake. J. Adv. Space Res., 47(6), 1001-1005.

Zakharenkova, I.E., Shagimuratov, I.I., Tepenitzina, N.Y., Krankowski, A. (2008). Anomalous modification of the ionospheric total electron content prior to the 26 September 2005 Peru earthquake. J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 70(15), 1919-1928.