

2014 Ege Denizi Depremi Öncesi GNSS İstasyonlarında Gözlemlenen TEC Anomalileri

Mustafa Ulukavak*, Mualla Yalçinkaya

Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 61080, Trabzon, Türkiye

Özet

Cilt: 3
Sayı: 1
Sayfa: 59-67
Kasım 2016

Son yıllarda, Küresel Konumlandırma Uydu Sistemleri (GNSS) alıcılarından elde edilen İyonosferik Toplam Elektron İçeriği (TEC) değerleri, sismik anomalileri tespit etmede artan bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada, Küresel Konumlandırma sistemi – Toplam Elektron İçeriği (GPS-TEC) değişimleri kullanılarak 2014 Ege Denizi depremi (40.305°N 25.453°E, 24 May 2014, 09:25:03 UT, Mw:6.9) öncesinde İyonosferik TEC’te gerçekleşen anormal değişimler araştırılmıştır. Deprem merkez üssü yakınındaki Türkiye Sabit GNSS Ağı’na (TUSAGA-Aktif) ait üç istasyon ve Uluslararası GNSS Servisi’ne (IGS) ait iki istasyondan elde edilen veriler kullanılarak deprem öncesi İyonosferik anomaliler tespit edilmiştir. Uzay iklim koşullarıyla ilişkili olan Güneş Aktivitesi İndeksi (F10.7) ve Jeomanyetik Aktivite İndeksi (Dst), deprem öncesi İyonosferik anomalileri analiz etmek için kullanılmıştır. Bu değerler incelendiğinde 8-15 Mayıs 2014 tarihleri arasında yüksek güneş aktivitesinin meydana geldiği görülmüştür. Düşey Toplam Elektron İçeriğindeki (VTEC) ilk anlamlı artış (pozitif anomali) depremden 10 gün önce 14 Mayıs 2014 tarihinde tespit edilmiştir. Bu değişim büyük ihtimalle yüksek güneş aktivitesinden dolayı gerçekleşmiştir. İndis değerleri, 15 Mayıs 2014 tarihinden sonra yüksek güneş aktivitesi veya Jeomanyetik aktivitenin gerçekleşmediğini vurgulamıştır. Depremden bir gün önce her istasyona ait İyonosferik TEC değişimlerinde anormal değişimler (negatif anomali) görülmüştür. Alt sınır değerden yaklaşık 10-20 TEC birimi (TECU) düşük olan bu değişimlerin 2014 Ege Denizi depreminin öncülü olabileceği düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler

İyonosfer, Toplam Elektron İçeriği, VTEC, Deprem, Ege Denizi, GNSS

Abstract

Observed TEC Anomalies by GNSS Sites Preceding the Aegean Sea Earthquake of 2014

Volume: 3
Issue: 1
Page: 59-67
November 2016

In recent years, Total Electron Content (TEC) data, obtained from Global Navigation Satellites Systems (GNSS) receivers, has been widely used to detect seismo-ionospheric anomalies. In this study, Global Positioning System – Total Electron Content (GPS-TEC) data were used to investigate ionospheric abnormal behaviors prior to the 2014 Aegean Sea earthquake (40.305°N 25.453°E, 24 May 2014, 09:25:03 UT, Mw:6.9). The data obtained from three Continuously Operating Reference Stations in Turkey (CORS-TR) and two International GNSS Service (IGS) sites near the epicenter of the earthquake is used to detect ionospheric anomalies before the earthquake. Solar activity index (F10.7) and geomagnetic activity index (Dst), which are both related to space weather conditions, were used to analyze these pre-earthquake ionospheric anomalies. An examination of these indices indicated high solar activity between May 8 and 15, 2014. The first significant increase (positive anomalies) in Vertical Total Electron Content (VTEC) was detected on May 14, 2014 or 10 days before the earthquake. This positive anomaly can be attributed to the high solar activity. The indices do not imply high solar or geomagnetic activity after May 15, 2014. Abnormal ionospheric TEC changes (negative anomaly) were observed at all stations one day before the earthquake. These changes were lower than the lower bound by approximately 10-20 TEC unit (TECU), and may be considered as the ionospheric precursor of the 2014 Aegean Sea earthquake.

Keywords

Ionosphere, Total Electron Content, VTEC, Earthquake, Aegean Sea, GNSS

* Sorumlu Yazar:
mulukavak@ktu.edu.tr, mualla@ktu.edu.tr

1. Giriş

Son zamanlarda, çift frekanslı GNSS alıcılarından elde edilen verilerin hem hassas konum belirlemede hem de iyonosferik çalışmalarda kullanıldığı bilinmektedir. Çift frekanslı GNSS alıcılarıyla elde edilen TEC verisi ile kullanıcılara üst atmosfer ile ilgili daha çok bilgi sağlanmıştır. 1964'te meydana gelen Büyük Alaska depremi, sismo-iyonosferik anomalilerin araştırılmasının yapıldığı ilk depremdir (Davies ve Baker 1965; Leonard ve Barnes 1965). Deprem öncülleri birçok bilim adamının ilgisini çekmiştir. Sismik aktiviteler ile iyonosferik değişimler arasındaki ilişki birçok çalışmanın ana konusu olmuştur (Parrot vd. 1993; Liperovsky vd. 2000; Afraimovich vd. 2001; Pulnits vd. 2003).

Araştırmacılar sismo-iyonosferik etkileri incelemek için çalışmalarında, uydu ve yer tabanlı araçlar kullanmışlardır. Calais ve Minster (1998) Northridge depremiyle iyonosferik etkileri arasındaki ilişki için GPS-TEC verilerini kullanmışlardır ve TEC değişimlerine, akustik gravite dalgalarının yaptığı etkiyi ortaya çıkarmışlardır. Deprem öncesi iyonosferik anomaliler depremden 15 gün önce ve sonra tespit edilmiştir (Calais ve Minster 1998). Liu vd. (2004) Tayvan bölgesinde 1999-2002 yılları arasında meydana gelmiş magnitudü 6 ve daha büyük depremleri araştırmışlardır. Bulgular, depremden 1-5 gün önce iyonosferik TEC'de azalma meydana geldiğini göstermiştir. Otsuka vd. (2006) yaptığı çalışmada, 26 Aralık 2004 tarihinde Endonezya'nın Batı Sumatra bölgesinde meydana gelen güçlü deprem sonrasında GPS-TEC değişimlerini incelemişlerdir. Deprem merkez üssünün kuzeyinden itibaren TEC değerlerinin yaklaşık 1.6-6.9 TECU civarında arttığını belirlemişlerdir. Hasbi vd. (2011) tarafından yapılan bir diğer araştırmada, Sumatra depreminin ($M \geq 7.0$) öncesinde meydana gelen iyonosferik tedirginlikleri belirlemede GPS verisi ve Challenging Minisatellite Payload (CHAMP) uydusu verilerini kullanılmıştır. Deprem birkaç saat öncesinden 6 gün öncesine kadar pozitif ve negatif anomalilerin ortaya çıktığını belirlenmiştir. Le vd. (2011), küresel iyonosfer haritalardan elde ettikleri Küresel İyonosfer Haritası TEC (GIM-TEC) verileriyle deprem öncesi iyonosferik anomalileri incelemişlerdir. Deprem merkez üssüne yakın bölgelerde gerçekleşen deprem öncesi iyonosferik değişimlerin incelenmesi dikkatleri üzerine toplayan bir konu haline gelmiştir. Bu nedenle, birçok çalışmada bazı özel depremler için deprem öncesi iyonosferik anomali incelemesi yapılmıştır (Calais ve Minster 1995; Chmyrev vd. 1997; Silina vd. 2001; Liu vd. 2000, 2006, 2008, 2010, 2011; Plotkin 2003; Rios vd. 2004; Pulnits ve Boyarchuk 2004; Trigunait vd. 2004; Hobara ve Parrot 2005; Liperovskaya vd. 2006; Krankowski vd. 2006; Zakharenkova vd. 2006; 2007, 2008; Singh ve Singh 2007; Zhao vd. 2008; Lin vd. 2009; Zhou vd. 2009; Hsiao vd. 2010; Lin 2010, 2012; Jyh-Woei 2011; Yao vd. 2012).

Bu çalışma, 2014 Ege Denizi depremi öncesinde GNSS istasyonlarındaki TEC anomalilerini incelemiştir. Makalenin 2. Bölümünde GNSS gözlemlerinden TEC değerlerinin elde edilmesi, 3. Bölümünde günlük TEC değişimlerinin analizi ve 4. Bölümünde Ege Denizi depremi öncesinde gözlemlenen öncüller açıklanmıştır. 5. Bölümde çalışmanın

sonuçları verilmiştir.

2. GNSS Gözlemlerinden TEC Verisinin Elde Edilmesi

İyonosferik TEC, kod (P) veya taşıyıcı faz (Φ) ölçülerinin geometriden bağımsız kombinasyonu kullanılarak belirlenebilir (Schmidt vd. 2008). Psoydo mesafe ölçülerinde, geometriden bağımsız doğrusal kombinasyonlar P_2 kod ölçülerini P_1 kod ölçülerinden çıkararak,

$$P_{4,u}^m = P_1 - P_2 = A \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) STEC_u^m + DCB^m + DCB_u \quad (1)$$

elde edilir. Burada, f_1 ve f_2 sırasıyla GPS uydularının L1 ve L2 taşıyıcı sinyallerinin frekanslarını; $A = 40.3 \text{ m}^3 / \text{s}^2$; $STEC_u^m$, her bir u alıcısı ve m uydusu arasındaki eğri sinyal yolu boyunca belirlenen Eğik Toplam Elektron İçeriği (STEC) değerini TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ elektron/m}^2$) biriminde; DCB^m ve DCB_u psodydo mesafe gözlemleri için uydu ve alıcı donanımlarına bağlı f_1 ve f_2 frekanslarındaki sinyal gecikmelerinin diferansiyel kod farklarını (DCBs) göstermektedir. Taşıyıcı faz gözlemlerinde geometriden bağımsız doğrusal kombinasyonlar Φ_2 faz gözlemini Φ_1 faz gözlemlerinden çıkarılarak,

$$\begin{aligned} \Phi_{4,u}^m &= \Phi_1 - \Phi_2 \\ &= -A \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) STEC_u^m + IFB^m + IFB_u + \Delta N_{u,4}^m \end{aligned} \quad (2)$$

elde edilir. Burada, IFB^m ve IFB_u sırasıyla taşıyıcı faz gözlemleri için uydu ve alıcı donanımlarına bağlı f_1 ve f_2 frekanslarındaki sinyal gecikmelerinin frekanslar arası farklarıdır (IFB). Eşitlik (2)'de tanımlanan birleştirilmiş faz belirsizliği terimi $\Delta N_{u,4}^m$,

$$\Delta N_{(u,4)}^m = \lambda_1 N_{(u,1)}^m - \lambda_2 N_{(u,2)}^m, \quad (3)$$

şeklinde hesaplanır. Burada, $N_{u,1}^m$ ve $N_{u,2}^m$ tamsayı faz belirsizliklerini, λ_1, λ_2 sırasıyla ilgili f_1 ve f_2 frekanslarındaki dalga boylarını göstermektedir (Komjathy 1997; Liao 2000; Leick 2004; Dach vd. 2007; Jin vd. 2012).

Yansız eğik TEC'in belirlenebilmesi için diferansiyel kod farklarının bilinmesi gerekmektedir. DCB değerleri günlük olarak bazı IGS istasyonları için IONEX dosyalarında ve çoğunlukla Jet Propulsion Laboratory (JPL), Center for Orbit Determination in Europe (CODE) ve European Space Agency (ESA) gibi iyonosferle ilişkilendirilmiş analiz merkezleri tarafından sunulmaktadır. STEC, DCB değerlerinin Eşitlik (1)'de verilen, geometriden-bağımsız doğrusal kombinasyondan çıkartılarak hesaplanır.

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) \left[P_{4,u}^m(n) - (DCB^m + DCB_u) \right] \quad (4)$$

Burada, n indisi 1'den N 'ye kadar olan, zaman indislerindeki kaydedilmiş toplam ölçülerin sayısını göstermektedir. Tipik bir GNSS alıcısı gözlemlerini 30 saniye aralıklarla kaydeder. 24 saatlik sürekli bir gözlem periyodunda N değeri en fazla

2880'dir. Eğer her bir uydu ve alıcı için DCB değerleri biliniyorsa STEC değeri her bir yay boyunca Eşitlik (4) ile hesaplanabilir. Ancak P_4 ölçülerinin gürültü seviyesi Φ_4 ölçülerinden daha yüksektir. Bu yüzden Φ_4 verisi P_4 verisine uydurularak yumuşatılır ve daha az gürültülü taşıyıcı faz ölçülerinin bu avantajından yumuşatılmış P_4 gözlemleri elde edilir. Literatürde birçok farklı yumuşatma algoritması önerilmektedir (Lanyi ve Roth 1988; Jakowski vd. 1996; Komjathy ve Langley 1996; Otsuka vd. 2002; Jin vd. 2012). Φ_4 'ün P_4 'e seviyelendirilmesi veya uydurulması genellikle faz ölçülerinin her bir kesintisiz yayı için bir sabit katsayı belirlenerek,

$$B^m = \frac{1}{N_{me}} \sum_{n_{me}=1}^{N_{me}} (P_{4,u}^m(n_{me}) + \Phi_{4,u}^m(n_{me})) \quad (5)$$

tanımlanır. Burada, B^m m uydu için sabit katsayısı değerini; N_{me} , her bir kesintisiz faz ölçüsündeki toplam örnek sayısını ve n_{me} , faz ölçüsüne ait toplam örnek sayısının zaman indisini göstermektedir. Her bir faz kayması veya faz kopukluğu giderilmesine bir diğer sabit katsayısının hesaplanmasıyla başlanır. Sabit katsayı değeri B^m , Φ_4 ile Eşitlik (6)'da birleştirilerek STEC değerleri:

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} \right) (B^m - \Phi_{4,u}^m(n) - (DCB^m + DCB_u)) \quad (6)$$

hesaplanır. STEC değeri hesaplandıktan sonra, STEC ve VTEC arasındaki ilişki için ince-kabuk yaklaşımı (Klobuchar 1986) kullanılarak tek tabaka iyonosfer modeli ile VTEC değerleri

$$M(z_m(n)) = \frac{STEC_u^m(n)}{VTEC_u^m(n)} \quad (7)$$

belirlenir. Burada, $z_m(n)$ alıcı konumunun uydu zenit açısı ve izdüşüm fonksiyonu $M(z)$,

$$M(z) = \frac{1}{\cos z'} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 z'}} \quad , \quad \sin z' = \frac{R}{R+H} \sin(\alpha z) \quad (8)$$

şeklinde tanımlanır. Burada, z' , uydu ile alıcı arasındaki sinyal yolunun ince tabakadaki keşimlerinin iyonosferi delme noktalarındaki (IPP) zenit açısını; R , dünyanın yarıçapını (6,378.137 km); $\alpha=0.9886$ iyileştirilmiş tek tabaka izdüşüm fonksiyonunun (Schaer 1999) ölçeklendirme faktörünü ve H , iyonosferik ince tabaka yüksekliğini (350 km) göstermektedir (Mannucci vd. 1993; Langley vd. 2002; Rao vd. 2006; Spogli vd. 2013; Chakraborty vd. 2014).

Uydulara ve alıcılara ait DCB değerleri günlük nihai IGS IONEX dosyalarından elde edilebilir. İstasyonlara ait bilinmeyen DCB değerleri günlük sabitler olarak bölgesel VTEC modeli tabanlı küresel harmonik fonksiyonlar kullanılarak kestirilebilir (Jin vd. 2012). Jin vd. (2012)'ye göre küresel harmonik serilerin mertebesi çalışma bölgesine bağlıdır ve bölgesel, kıtasal ve küresel ölçekteki çalışmalarda sırasıyla 4, 8 ve 15. mertebeden seçilebilir. Sonra kalibre edilmiş STEC değişimleri her bir uydu yayından DCB değerlerinin elimine edilmesi [Eşitlik (6)] ile belirlenir ve VTEC değerleri Eşitlik (7)'deki iz düşüm fonksiyonu

kullanılarak her bir sürekli yay boyunca hesaplanabilir.

3. Günlük GPS-TEC Değişimlerinin Analizi

Önceki bölümde kalibre edilmiş VTEC değerleri her bir uydu yayı için belirlenmişti. Anormal günleri belirlemek için IPP noktalarındaki VTEC değerlerinden günlük istasyon üstü VTEC değişimleri elde edilmelidir. Bu çalışmada, 24 saat boyunca her bir yer istasyonu üzerindeki saatlik VTEC değişimleri, ikinci dereceden polinomal yüzey modeli ile belirlenerek (Durmaz ve Karslioglu 2014)

$$VTEC(\varphi_{IPP}, S_{IPP}) = a_0 + a_1 \varphi_{IPP} + a_2 S_{IPP} + a_3 \varphi_{IPP}^2 + a_4 \varphi_{IPP} S_{IPP} + a_5 S_{IPP}^2 \quad (9)$$

eşitliğinden elde edilmiştir. Burada, φ_{IPP} ve S_{IPP} IPP'lerin güneş-sabit referanslı küresel koordinatlarını; a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 ve a_5 polinomal yüzey katsayılarını göstermektedir. Eşitlik (9)'a göre bilinmeyen saatlik polinomal yüzey katsayıları en küçük kareler yöntemine (EKK) göre kestirilmiştir. Polinomal yüzey katsayılarının saatlik kestirimi için kullanılan veri penceresi 120 epoka ayarlanmıştır (her saat için önce ve sonra 60 epok). Her bir istasyon için saatlik VTEC değerleri, o istasyonun güneş-sabit küresel koordinatları Eşitlik (9)'da kestirilen polinomal yüzey katsayılarıyla birlikte yerine koyularak tekrar hesaplanmıştır. Saatlik VTEC değerleri kestirilirken kullanılan yetersiz veriler problemlere sebep olmaktadır. Bu yüzden, istasyon üstü kayıp VTEC değerleri IGS IONEX dosyalarından elde edilen ızgara TEC verilerinin enterpolasyonu yapılarak tamamlanmalıdır (Schaer vd. 1998).

TEC'deki anormal değişimlerin belirlenmesinde Liu vd. (2009) çalışmasındaki çeyrekler arası fark tabanlı istatistiksel analiz yönteminin benzeri kullanılmıştır. Çeyrekler arası fark tabanlı istatistiksel analiz yönteminde, önce GPS-TEC değerlerine ait hareketli ortanca (M) değerleri hesaplandı. Sonra birinci (veya düşük: LQ) ve üçüncü (veya yüksek: UQ) çeyrekler hesaplandı. GPS-TEC değerlerinin ortalama değeri (m) ve standart sapması (σ) olan normal dağılımda oldukları varsayımı ile M, LQ ve UQ değerleri m ve 1.34σ güvenle elde edilmiştir (Klotz ve Johnson 1983). Alt sınır (LB) ve üst sınır (UB) sırasıyla $LB=M-1.5(M-LQ)$ ve $UB=M+1.5(UQ-M)$ eşitliklerinden bulunur. Anormal değişimler gözlemlenen GPS-TEC'in ilgili UB değerinden yüksek veya ilgili LB değerinden düşük olması ile belirlenmiştir (Liu vd. 2009). Örnek olarak ilk 15 güne ait VTEC değerleri kullanılarak 16. gün için ortanca, üst ve alt sınır değerleri oluşturulmuştur. Benzer şekilde 2. ve 16. günler arasındaki 15 günün VTEC değişimleri de 17. günün sınır değerlerini oluşturmak için kullanılmıştır. Üst ve alt sınır değerlerin hesaplanması verilerin sonuna kadar devam etmiştir. Her bir gündeki veri sayısının $1/3$ 'ü (gün içindeki 8 saatlik anormallik) üst sınır değerden fazla veya alt sınır değerden az ise anormal gün olarak işaretlenmiştir.

4. Ege Denizi Depremi'nin Gözlemlenen Öncüleri

Bu çalışmada, Ege Denizi'nde 24 Mayıs 2014 tarihinde saat 09:25:03 UT'de (<http://earthquake.usgs.gov/>) meydana

gelen Mw 6.9 büyüklüğündeki güçlü deprem incelenmiştir. Ege Denizi depreminin ionosferik öncülerini belirlemek için deprem merkez üssüne yakın bölgedeki TUSAGA-Aktif ve IGS istasyonlarına ait GPS ölçüleri kullanılarak elde edilen anormal VTEC değişimleri belirlenmiştir. Deprem öncesi ionosferik anomalileri analiz etmek için, uzay iklim koşullarıyla ilişkili iki indeks (F10.7 ve Dst) değeri incelenmiştir. TEC'deki anormal değişimler çeyrekler arası fark tabanlı istatistiksel analiz yöntemi kullanılarak yapılmıştır (Liu vd. 2009). Liu vd. (2009)'da GIM-TEC verileri (2 saat çözünürlükte) deprem merkez üssü için elde edilerek kullanılmıştır. Bu çalışmada GPS-TEC verileri (1 saat çözünürlükte) deprem merkez üssüne yakın GNSS istasyonlarından yüzey polinomu geçirilerek elde edilmiştir.

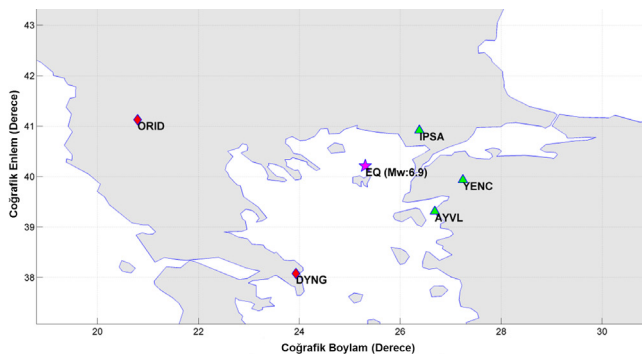
Dobrovolsky et al. (1979)'a göre deprem hazırlık alanının yarıçapı,

$$\rho = 10^{0.43 * M} \text{ km} \quad (10)$$

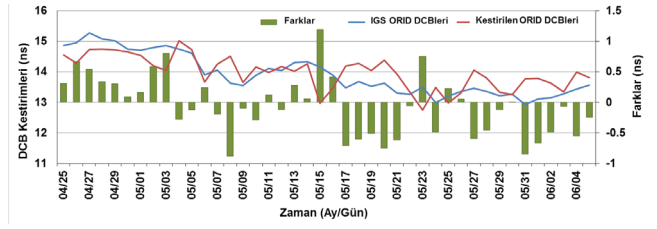
olarak tanımlanmıştır. Burada, ρ , deprem hazırlık alanının yarıçapını; M moment magnitudü ölçeğinde depremin büyüklüğünü göstermektedir. Mw 6.9 büyüklüğündeki bir depremin hazırlık alanı deprem merkez üssünden itibaren yaklaşık 926.82 km'lere kadar genişlemektedir. Türkiye'deki 3 TUSAGA-Aktif (AYVL, IPSA ve YENC) ve Yunanistan ve Makedonya'daki 2 IGS istasyonunun (DYNG ve ORID) coğrafi konumları Şekil 1'de görülmektedir.

25 Nisan-5 Haziran 2014 tarihleri arasında saatlik GPS-TEC değişimleri Bölüm 2'de açıklanan yöntemle hesaplanmıştır. IGS istasyonlarının Alıcıdan Bağımsız Değişim Formatı (RINEX) dosyaları, Hassas uydü yürümesi (SP3) dosyaları ile İyonosferik TEC Haritaları ve DCB'leri (IONEX) dosyaları, Kabuk Dinamikleri Verisi ve Bilgi Sistemi (CDDIS) GNSS veri ve ürünleri arşivi ftp://cddis.gsfc.nasa.gov adresinden alınmıştır. TUSAGA-Aktif RINEX dosyaları Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü (TKGM) TUSAGA-Aktif Ağı arşivlerinden indirilmiştir.

Taşıyıcı faz gözlemlerindeki faz kaymaları ve kaba hataları, psoydo mesafe gözlemlerini yumuşatmak için kullanılmadan önce faz gözlemlerinden kaldırmak gerekir. Bu nedenle, RINEX dosyalarında bulunan tüm gözlemlerin faz kaymaları Bernese v5.0 yazılımı içindeki yumuşatma algoritması uygulanarak tespit edilmiş ve faz kesiklikleri ortadan kaldırılmıştır. Günlük nihai IGS IONEX dosyalarından alınan uydulara ait DCB kestirimleri, M_DCB yazılımı içinde, alıcı DCB'leri belirlenirken bilinen sabit



Şekil 1 : TUSAGA-Aktif istasyonları (üçgen), IGS istasyonları (elmas) ve Ege Denizi depremi merkez üssü (yıldız) coğrafi konumları.



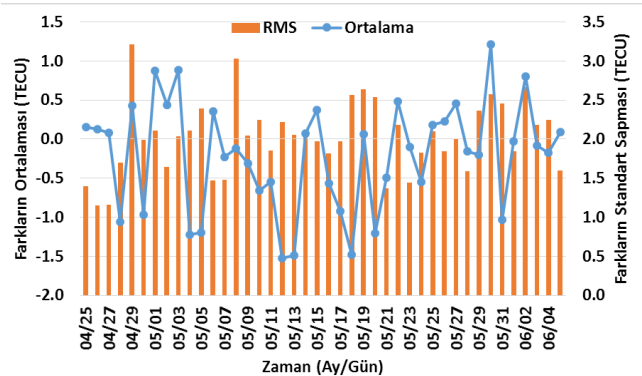
Şekil 2 : 25 Nisan ve 5 Haziran 2014 tarihleri arasında ORID istasyonuna ait günlük DCB kestirimlerinin IGS IONEX dosyaları değerleriyle karşılaştırması (mavi çizgi: IONEX dosyalarındaki ORID IGS DCB'leri; kırmızı çizgi kestirilen ORID DCB'leri).

terimler olarak, yumuşatılan RINEX dosyaları ile birlikte, bölgesel VTEC modellemede tekrar kullanılmıştır (Jin vd. 2012). VTEC modelinde küresel harmonikler uygulanmıştır. Çalışma alanının büyüklüğü ve burada bulunan GNSS alıcılarının sayısına göre M_DCB yazılımındaki küresel harmoniklerin genişletileceği maksimum mertebeye 4 olarak seçilmiştir. GPS sinyallerindeki çok yolluluk etkilerini önlemek için yükseklik kesme açısı 10 derece olarak belirlenmiştir. Kalibre edilmiş STEC değişimleri kestirilen DCB değerlerinin her bir uydü yayından kaldırılarak elde edilmiştir. Daha sonra ilgili izdüşüm fonksiyonu kullanılarak her bir sürekli yay boyunca elde edilen STEC değerlerinden, VTEC değerleri elde edilmiştir. Tüm hesaplamalar ve istatistiksel uygulamalar MATLAB yazılımı ile yapılmıştır. Tüm haritalar ve grafikler MATLAB ortamında çizdirilmiştir.

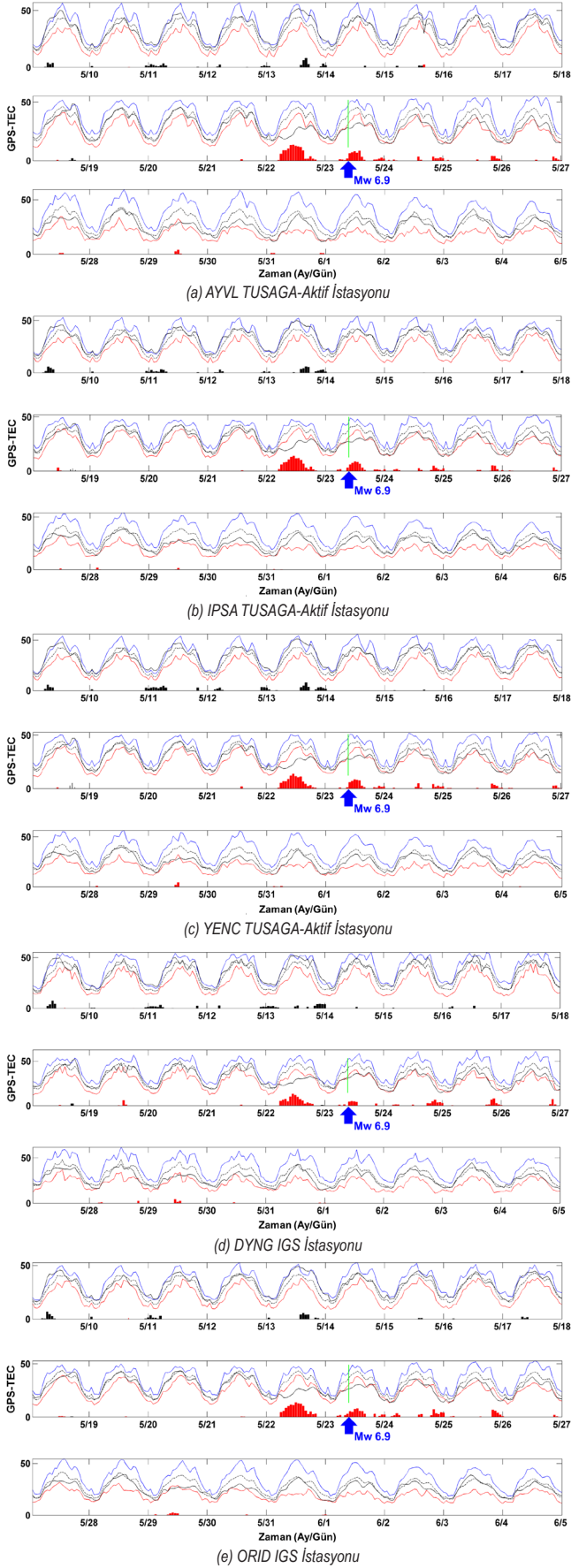
DCB kestirimlerinin güvenilirliğini kontrol etmek için ORID istasyonuna ait DCB değerleri ile ORID istasyonunun kestirilen DCB değerleri karşılaştırılmıştır. ORID istasyonunun kullanılmasının sebebi günlük nihai IGS IONEX dosyalarında da bulunan aynı istasyon olmasıdır. ORID istasyonunun kestirilen günlük alıcı DCB değerleri ile IGS IONEX DCB'leri arasındaki farklar Şekil 2'de gösterilmektedir.

Şekil 2'de, ORID istasyonunun kestirilen DCB değerleri IGS IONEX dosyalarından alınan DCB değerleriyle kıyaslandığında aralarındaki farkın 1 ns'den az olduğu görülmektedir. DCB farkları sadece 15 Mayıs 2014 tarihinde (1.12 ns) 1 ns'den fazladır. ORID istasyonunun kestirilen DCB değerleri ve IGS IONEX dosyalarından alınan DCB değerlerinin farklarının Karesel Ortalama Hatası (RMS) ± 0.24 ns olarak hesaplanmıştır. Sonuçlar, ORID istasyonuna ait kestirilen DCB değerlerinin güvenilir olarak kabul edilebileceğini göstermektedir.

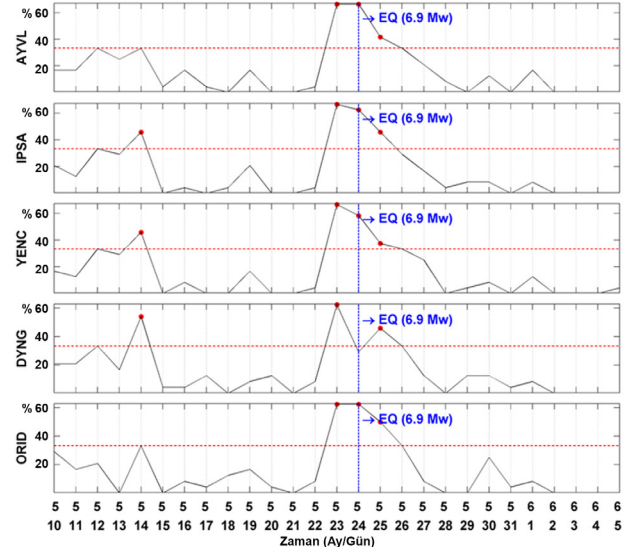
Bu karşılaştırmaya ek olarak IGS ve TUSAGA-Aktif istasyonlarının hesaplanan VTEC değerleri ile günlük



(a) AYVL TUSAGA-Aktif İstasyonu



Şekil 5 : Ege denizi depremi öncesi ve sonrası her bir istasyon üstü GPS-TEC değişimleri, üst (yükselmeler), düşüşler (azalmalar) ve ortanca anomaliler (yukarı yönlü mavi ok: depremin meydana geliş anı; siyah çizgi: kestirilen GPS-TEC değişimleri; mavi çizgi: üst sınır (UB); kırmızı çizgi: alt sınır (LB); kesikli siyah çizgi: ortanca değerler (M); siyah renkli alanlar: VTEC-UB; kırmızı renkli alanlar: LB-VTEC).



Şekil 6 : 10 Mayıs- 5 Haziran 2014 tarihleri arasındaki üst ve alt sınır anormal günlerine ait yüzdelik değişimler (kesikli yatay kırmızı çizgi: günlük anormal VTEC değerinin sınır değer yüzdesi; kırmızı noktalar: sınır değeri aşan günlerdeki üst ve alt anormal değişimler; kesikli dikey gri çizgi: güneş aktivitesinin son günü (15 Mayıs 2014); kesikli dikey mavi çizgi: depremin gerçekleştiği gün).

Bölüm 3'te bahsedilen yöntemle hesaplanmıştır (Şekil 5).

Şekil 4 ve 5'te görüldüğü gibi, 8 - 15 Mayıs 2014 tarihleri arasında güneş aktivitesi değerleri yüksektir. Güneş aktivitesi depremden 10 gün önce (14 Mayıs 2014) tarihinde en üst değerine ulaşmıştır. GPS-TEC değerlerinin UB'den (siyah renkli alanlar) büyük olması, Ege Denizi depremi öncesi sismo-iyonosferik etkilerin bu tarih aralığında araştırılmasında yanlış kararlar verilmesine sebep olabilir. Ancak, uzay iklim koşullarının sakin olduğu 15 Mayıs 2014 tarihinden sonra, Ege Denizi depreminin sismo-iyonosferik etkilerinin araştırılması daha uygundur. Şekil 5'te açık bir şekilde görüldüğü gibi her bir istasyona ait VTEC değişimi depremden bir gün önce (23 Mayıs 2014) yaklaşık 10-20 TECU değerinde LB (kırmızı renkli alanlar) değerlerinden daha küçük görülmektedir.

Günlük VTEC değişimlerinin LB veya UB sınırlarından düşük veya yüksek olan veri sayılarının yüzdesi belirlenmiş ve bir gündeki değişimin $\sim 33\%$ 'ü (bir günde 8 saatlik anomallik) sınır değer kabul edilerek çizdirilmiştir (Şekil 6).

Şekil 6'da depremden önce ve sonra anormal VTEC değişimlerine ait günler görülmektedir. Anormal VTEC değişimlerine ait yüzdelik AYVL, IPSA ve YENC istasyonları için %66.67, DYNG ve ORID istasyonları için %62.50 değeriyle 23 Mayıs 2014 tarihinde başlamıştır.

Tablo 1'de Ege Denizi depreminden önce ve sonra görülen tüm yüzdelik değişimler hesaplanmıştır.

Tablo 1'de görüldüğü gibi, 14 Mayıs gününde görülen yüzdelik değişimler 15 Mayıs 2014 tarihinde biten güneş

Tablo 1. Tüm istasyonlara ait anormal VTEC değişimlerinin yüzdeleri

İstasyon	14 Mayıs	23 Mayıs	24 Mayıs	25 Mayıs
AYVL	-	66.67	66.67	41.67
IPSA	45.83	66.67	62.50	45.83
YENC	45.83	66.67	58.33	37.50
DYNG	54.17	62.50	-	45.83
ORID	-	62.50	62.50	50.00

aktivitesi değeri ile ilişkilendirilebilir. Diğer taraftan 23, 24 ve 25 Mayıs günlerinde hesaplanan yüzdelik değerler ise uzay iklim koşullarından çok Ege Denizi depremi ile ilişkili sayılabilir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, 2014 Ege Denizi depremi öncesinde meydana gelen iyonosferik TEC anomalileri araştırılmıştır. Güneş aktivitesi (F10.7) ve Jeomanyetik aktivite (Dst) indisleri incelenmiştir. İyonosferik TEC değerleri GNSS verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Güneş aktivitesi değerleri karşılaştırıldığında, 8-15 Mayıs 2014 tarihleri arasında yüksek güneş aktivitesi olduğu belirlenmiştir. İyonosferik TEC değerleri 8-15 Mayıs 2014 tarihleri arasında UB değerlerinden büyük çıkmış ve depremden 10 gün önce (14 Mayıs 2014) en üst seviyesine ulaşmıştır. Bu anomalilerin daha çok uzay iklim koşullarına bağlı olduğu düşünülmektedir. Bu yüzden iyonosferik TEC anomalileri güneş aktivitesinin az olduğu 15 Mayıs - 6 Haziran 2014 tarihleri arasında incelenmiştir. 23, 24 ve 25 Mayıs 2014 tarihlerinde VTEC değerleri o günlere ait LB değerlerinden yaklaşık 10-20 TECU daha küçük hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi tüm istasyonlarda güneş aktivitesinin olmadığı günlere ait TEC değerlerindeki ilk anormal değişim depremden bir gün önce (23 Mayıs 2014) tespit edilmiştir. Bu bağlamda, anormal değişim, 2014 Ege Denizi depreminin iyonosferik öncülü olarak kabul edilebilir.

GNSS teknolojisinin ve özümleme tekniklerinin geliştirilmesi, iyonosferi tanımda bize daha çok katkı sağlayacaktır. Yakın gelecekte GPS-TEC sismo-iyonosferik bağlantı mekanizmasını keşfetmek için daha çok kullanılacaktır.

Bu makale sadece Ege Denizi depremi öncesi iyonosferik değişimin gösterilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu depremin sismo-iyonosferik etkilerinin fiziksel mekanizması gelecekte yapılacak çalışmalarda değerlendirilecektir.

Teşekkürler. Yazarlar, Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü'ne (TKGM) TUSAGA-Aktif ağı GPS kayıtlarını sağladıkları için, Kabuk Dinamikleri Verisi ve Bilgi Sistemi'ne (CDDIS) RINEX, SP3 ve IONEX dosyalarını sağladıkları için, Jeomanyetizma ve Uzay Manyetizması Veri Analiz Merkezi Kyoto Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne (WDC) Jeomanyetik verileri sağladığı için ve Ottawa'daki Kanada Uzay İklim Tahmini Merkezi'ne (CSWFC) güneş aktivitesi verilerini sağladıkları için teşekkürlerimizi bildiririz. Yazarlar olarak, derginin editörüne ve iki anonim hakemine makalenin kalitesini iyileştirmede yaptıkları değerli yorumlarından ve olumlu eleştirilerinden dolayı teşekkürlerimizi bildiririz. Yazarlar ayrıca Yrd. Doç. Dr. Emine Tanır Kayıkçı ve Arş. Gör. Volkan Yılmaz'a makalenin çeviri ve dilbilgisine verdikleri katkılardan dolayı teşekkürlerini bildirmektedirler.

Kaynaklar

Afraimovich E.L., Kosogorov E.A., Perevalova N.P., Plotnikov A.V., (2001), *The use of GPS arrays in detecting shock-acoustic waves generated during rocket launchings*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 63, 1941-1957.

- Bruevich E.A., Bruevich V.V., Yakunina G.V., (2014), *Changed relation between solar 10.7-cm radio flux and some activity indices which describe the radiation at different altitudes of atmosphere during cycles 21-23*, Journal of Astrophysics and Astronomy, 35, 1-15.
- Calais E., Minster J.B., (1995), *GPS Detection of ionospheric perturbations following the January 17, 1994, Northridge earthquake*, Geophysical Research Letters, 22, 1045-1048.
- Calais E., Minster J.B., (1998), *GPS, earthquakes, the ionosphere, and the space shuttle*, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 105, 167-181.
- Chakraborty M., Kumar S., De B.K., Guha A., (2014), *Latitudinal characteristics of GPS derived ionospheric TEC: a comparative study with IRI 2012 model*, Annals of Geophysics, doi:10.4401/ag-6438.
- Chmyrev V.M., Isaev N.V., Serebryakova O.N., Sorokin V.M., Sobolev Y.P., (1997), *Small-scale plasma inhomogeneities and correlated ELF emissions in the ionosphere over an earthquake region*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 59, 967-974.
- Coley W.R., Stoneback R.A., Heelis R.A., Hairston M.R., (2014), *Topside equatorial zonal ion velocities measured by C/NOFS during rising solar activity*, Annales Geophysicae, 32, 69-75.
- Contadakis M., Arabelos D., Pikridas C., Spatalas S., (2012), *Total electron content variations over southern Europe before and during the M 6.3 Abruzzo earthquake of April 6, 2009*, Annals of Geophysics, 55, 83-93.
- Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M., (2007), *Manual of Bernese GPS Software Version 5.0*, Astronomical Institute, University of Bern, Bern.
- Davies K., Baker D.M., (1965), *Ionospheric effects observed around time of Alaskan earthquake of March 28 1964*, Journal of Geophysical Research, 70, 2251-2253.
- Dobrovolsky I.P., Zubkov S.I., Miachkin V.I., (1979), *Estimation of the size of earthquake preparation zones*, Pure and Applied Geophysics, 117, 1025-1044.
- Durmaz M., Karslioglu M.O., (2014), *Regional Vertical Total Electron Content (VTEC) modeling together with satellite and receiver Differential Code Biases (DCBs) using Semi-Parametric Multivariate Adaptive Regression B-splines (SP-BMARS)*, Journal of Geodesy, doi: 10.1007/s00190-014-0779-8.
- Hasbi A.M., Ali M.A.M., Misran N., (2011), *Ionospheric variations before some large earthquakes over Sumatra*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 11, 597-611.
- Hobara Y., Parrot M., (2005), *Ionospheric perturbations linked to a very powerful seismic event*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 67, 677-685.
- Hsiao C.C., Liu J.Y., Oyama K.I., Yen N.L., Liou Y.A., Chen S.S., Miao J.J., (2010), *Seismo-ionospheric precursor of the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake observed by FORMOSAT-3/COSMIC*, GPS Solutions, 14, 83-89.
- Jakowski N., Sardon E., Engler E., Jungstand A., Klahn D., (1996), *Relationships between GPS-signal propagation errors and EISCAT observations*. Annales Geophysicae, 14, 1429- 1436.
- Jin R., Jin S.G., Feng G.P., (2012), *M_DCB: Matlab code for estimating GNSS satellite and receiver differential code biases*, GPS Solutions, 16(4), 541-548, doi: 10.1007/s10291-012-0279-3.
- Jyh-Woei L., (2011), *Use of principal component analysis in the identification of the spatial pattern of an ionospheric total electron content anomalies after China's May 12, 2008, M=7.9 Wenchuan earthquake*, Advances in Space Research, 47, 1983-89.

- Kamide Y., Yokoyama N., Gonzalez W., Tsurutani B.T., Daglis I.A., Brekke A., Masuda S., (1998), *Two-step development of geomagnetic storms*, Journal of Geophysical Research-Space Physics, 103, 6917-21.
- Klobuchar J., (1986), *Design and characteristics of the GPS ionospheric time-delay algorithm for single-frequency users*, In: Proceedings of the IEEE Position Location and Navigation Symposium (Las Vegas, November 4-7).
- Klotz S., Johnson N.L. (Eds.), (1983), *Encyclopedia of Statistical Sciences*, John Wiley and Sons.
- Komjathy A., (1997), *Global ionospheric total electron content mapping using the global positioning system*, Ph.D. Thesis, Dept. of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 188. Univ. of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.
- Komjathy A., Langley R., (1996), *An assesment of predicted and measured ionospheric total electron content using a regional GPS network*. paper presented at Nat. Tech. Meet., Inst. of Nav., Santa Monica, CA 22-24 January.
- Krankowski A., Zakharenkova I.E., Shagimuratov I.I., (2006), *Response of the ionosphere to the Baltic Sea earthquake of 21 September 2004*, Acta Geophysica, 54, 90-101.
- Langley R., Fedrizzi M., Paula E., Santos M., Komjathy A., (2002), *Mapping the low latitude ionosphere with GPS*, GPSWorld 13(2), 41-46.
- Lanyi G.E., Roth T., (1988), *A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations*. Radio Science, 23, 483-492.
- Le H., Liu J.Y., Liu L., (2011), *A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+earthquakes during 2002-2010*, Journal of Geophysical Research-Space Physics, doi:10.1029/2010JA015781.
- Leick A., (2004), *GPS Satellite Surveying*, 3rd ed., John Wiley and Sons Inc., New Jersey.
- Leonard R.S., Barnes R.A., (1965), *Observation of ionospheric disturbances following Alaska earthquake*, Journal of Geophysical Research, 70, 1250-1253.
- Liao, X., (2000), *Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network*, M.Sc. Thesis, University of Calgary, Canada.
- Lin J., Wu Y., Zhu F., Qiao X., Zhou Y., (2009), *Wenchuan earthquake ionosphere TEC anomaly detected by GPS*, Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition, 52, 297-300.
- Lin J., (2010), *Ionospheric total electron content (TEC) anomalies associated with earthquakes through Karhunen-Loeve Transform (KLT)*, Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 21, 253-265.
- Lin J., (2012), *Ionospheric total electron content seismo-perturbation after Japan's March 11, 2011, M=9.0 Tohoku earthquake under a geomagnetic storm; a nonlinear principal component analysis*, Astrophysics and Space Science, 341, 251-258.
- Liperovskaya E.V., Parrot M., Bogdanov V.V., Meister C.V., Rodkin M.V., Liperovsky V.A., (2006), *On variations of f_oF_2 and F -spread before strong earthquakes in Japan*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, 735-739.
- Liperovsky V.A., Pokhotelov O.A., Liperovskaya E.V., Parrot M., Meister C.V., Alimov O.A., (2000), *Modification of sporadic E-layers caused by seismic activity*, Surveys in Geophysics, 21, 449-486.
- Liu J.Y., Chen Y.I., Pulinets S.A., Tsai Y.B., Chuo Y.J., (2000), *Seismo-ionospheric signatures prior to $M \geq 6.0$ Taiwan earthquakes*, Geophysical Research Letters, 27, 3113-3116.
- Liu J.Y., Chen Y.I., Chuo Y.J., Tsai H.F., (2001), *Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi earthquake*, Geophysical Research Letters, 28, 1383-1386.
- Liu J., Chuo Y., Shan S., Tsai Y., Chen Y., Pulinets S., Yu S., (2004), *Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements*, Annales Geophysicae, 22, 1585-1593.
- Liu J.Y., Tsai Y.B., Chen S.W., Lee C.P., Chen Y.C., Yen H.Y., Chang W.Y., Liu C., (2006), *Giant ionospheric disturbances excited by the M9.3 Sumatra earthquake of 26 December 2004*, Geophysical Research Letters, doi:10.1029/2005GL023963.
- Liu J.Y., Chen S.W., Chen Y.C., Yen H.Y., Chang C.P., Chang W.Y., Tsai L.C., Chen C.H., Yang W.H., (2008), *Seismo-ionospheric precursors of the 26 december 2006 m 7.0 Pingtung earthquake doublet*, Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 19, 751-59.
- 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 M(w)7.9 Wenchuan earthquake*, Journal of Geophysical Research-Space Physics, doi:10.1029/2008JA013698.
- Liu J.Y., Chen Y.I., Chen C.H., Hattori K., (2010), *Temporal and spatial precursors in the ionospheric global positioning system (GPS) total electron content observed before the 26 December 2004 M9.3 Sumatra-Andaman Earthquake*, Journal of Geophysical Research-Space Physics, doi:10.1029/2010JA015313.
- Liu J.Y., Chen C.H., Lin C.H., Tsai H.F., Chen C.H., Kamogawa M., (2011), *Ionospheric disturbances triggered by the 11 March 2011 M9.0 Tohoku earthquake*, Journal of Geophysical Research-Space Physics, doi:10.1029/2011JA016761.
- Mannucci A.J., Wilson B.D., Edwards C.D., (1993), *A new method for monitoring the Earth's ionosphere total electron content using the GPS global network*, In: Proc. of ION GPS-93, Inst. of Navigation, pp.1323-1332.
- Otsuka Y., Ogawa T., Saito A., Tsugawa T., Fukao S. Miyazaki S., (2002), *A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan*, Earth Planets and Space, 54, 63-70.
- Otsuka Y., Kotake N., Tsugawa T., Shiokawa K., Ogawa T., Effendy, Saito S., Kawamura M., Maruyama T., Hemmakorn N., Komolmis T., (2006), *GPS detection of total electron content variations over Indonesia and Thailand following the 26 December 2004 earthquake*, Earth Planets and Space, 58, 159-65.
- Parrot M., Achache J., Berthelier J.J., Blanc E., Deschamps A., Lefeuvre F., Menvielle M., Plantet J.L., Tarits P., Villain J.P., (1993), *High-frequency seismo-electromagnetic effects*, Physics of the Earth and Planetary Interiors, 77, 65-83.
- Plotkin V.V., (2003), *GPS detection of ionospheric perturbation before the 13 February 2001, El Salvador earthquake*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 3, 249-53.
- Pulinets S.A., Legen'ka A.D., Gaivoronskaya T.V., Depuev V.K., (2003), *Main phenomenological features of ionospheric precursors of strong earthquakes*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 65, 1337-1347.
- Pulinets S.A., Boyarchuk K., (2004), *Ionospheric Precursors of Earthquakes*, Springer, Berlin.
- Rao P.V.S.R., Niranjan K., Prasad D.S.V.V.D., Krishna S.G., Uma G., (2006), *On the validity of the ionospheric pierce point (IPP) altitude of 350 km in the Indian equatorial and low-latitude sector*, Annales Geophysicae, 24, 2159-2168.
- Rios V.H., Kim V.P., Hegai V.V., (2004), *Abnormal perturbations in the F2 region ionosphere observed prior to the great San Juan earthquake of 23 November 1977*, Monitoring of Changes Related to Natural and Manmade Hazards Using Space Technology, 33, 323-27.
- Rozhnoi A., Solovieva M.S., Molchanov O.A., Hayakawa M., (2004), *Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions*, Physics and Chemistry of the Earth, 29, 589-98.

- Schaer S., Gurtner W., Feltens J., (1998), *IONEX: The IONosphere Map EXchange format Version 1*, Proceedings of the 1998 IGS Analysis Center Workshop, Darmstadt, Germany.
- Schaer S., (1999), *Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the global positioning system*, Ph. D. thesis, University of Berne, Switzerland.
- Schmidt M., Bilitza D., Shum C.K., Zeilhofer C., (2008), *Regional 4-D modeling of the ionospheric electron density*, Advances in Space Research, 42, 782-790.
- Silina A.S., Liperovskaya E.V., Liperovsky V.A., Meister C.V., (2001), *Ionospheric phenomena before strong earthquakes*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 1, 113-118.
- Singh B., Singh O.P., (2007), *Simultaneous ionospheric E- and F-layer perturbations caused by some major earthquakes in India*, Annals of Geophysics, 50, 111-122.
- Spogli L., Alfonsi L., Cilliers P.J., Correia E., De Franceschi G., Mitchell C.N., Romano V., Kinrade J., Angel Cabrera M., (2013), *GPS scintillations and total electron content climatology in the southern low, middle and high latitude regions*, Annals of Geophysics, doi:10.4401/ag-6240.
- Trigunait A., Parrot M., Pulinet S., Li F., (2004), *Variations of the ionospheric electron density during the Bhuj seismic event*, Annales Geophysicae, 22, 4123-4131.
- Vitinsky Y.I., Kopecky M., Kuklin G.V., (1986), *Statistics of sunspot activity (in Russian)*, Nauka, Moscow.
- Yao Y., Chen P., Wu H., Zhang S., Peng W., (2012), *Analysis of ionospheric anomalies before the 2011 M-w 9.0 Japan earthquake*, Chinese Science Bulletin, 57, 500-510.
- Zakharenkova I.E., Krankowski A., Shagimuratov I.I., (2006), *Modification of the low-latitude ionosphere before the 26 December 2004 Indonesian earthquake*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 6, 817-823.
- Zakharenkova I., Shagimuratov I., Krankowski A., Lagovsky A., (2007), *Precursory phenomena observed in the total electron content measurements before great Hokkaido earthquake of september 25, 2003 (M=8.3)*, Studia Geophysica Et Geodaetica, 51, 267-278.
- Zakharenkova I., Shagimuratov I., Tepenitzina N., Krankowski A., (2008), *Anomalous modification of the ionospheric total electron content prior to the 26 September 2005 Peru earthquake*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 70, 1919-1928.
- Zhao B., Wang M., Yu T., Wan W., Lei J., Liu L., Ning B., (2008), *Is an unusual large enhancement of ionospheric electron density linked with the 2008 great Wenchuan earthquake?*, Journal of Geophysical Research-Space Physics, doi:10.1029/2008JA013613.
- Zhou Y., Wu Y., Qiao X., Zhang X., (2009), *Ionospheric anomalies detected by ground-based GPS before the Mw7.9 Wenchuan earthquake of May 12, 2008, China*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 71, 959-966.