Yerbilimleri, 2018, 39 (2), 117-130
Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni
Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University

Türkiye'de Meydana Gelen Depremlerin İyonküre Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

The Analysis of the Effects of the Earthquakes in the Ionosphere over Turkey

SEÇİL KARATAY[1]

[1] Kastamonu Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kuzeykent, Kastamonu

Geliş *(received)* : 26 Aralık (December) 2017
Kabul *(accepted)* : 25 Temmuz (July) 2018

ÖZ

Yer'in iyonküresi, uzay-havası incelemelerinde önemli bir etkendir ve bu nedenle iyonkürenin değişkenliğinin incelenmesi, başta iyonküre fiziği ve radyo iletişimi olmak üzere birçok alanda önemlidir. İyonküreyi karakterize eden temel parametreler, yükseklik, enlem, boylam, jeomanyetik işleklik, güneş işlekliği ve sismik hareketlilikle değişimler gösteren elektron yoğunluğudur. İyonküreyi karakterize eden bir diğer parametre ise atmosferde bir yol boyunca hesaplanan serbest elektronların miktarına eşit olan Toplam Elektron İçeriğidir (TEİ). TEİ ölçümleri, uzay havasındaki değişimleri ve sismik hareketliliğin iyonkürede yarattığı etkileri sergilemeye olanak sağlar. Bu çalışmada, Türkiye'de konumlanmış Türkiye Ulusal Sabit GPS İstasyonları Ağındaki (TUSAGA-Aktif) on bir Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) istasyonlarından elde edilen TEİ verileri, Çapraz İlinti Katsayısı (ÇİK), Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (KLD), L2-Normu (L2N) kullanılarak iyonkürenin sakin günlerini, şiddetli jeomanyetik fırtınaların yaşandığı günlerini ve büyüklükleri farklı depremlerin yaşandığı günlerini kapsayan üç dönem için karşılaştırılmıştır. Buna göre, birbirine 340 km mesafe alanında bulunan istasyonlar için KLD ve L2N yönteminin sismik hareketliliği, jeomanyetik bozulmadan ve sakin durumlardan ayırabildiği gözlenmiştir. Her bir istasyonun üç dönem için elde edilen TEİ değerleri, ÇİK, KLD ve L2N yöntemleri kullanılarak ortalama sakin bir günde elde edilen TEİ değeriyle karşılaştırıldığında sadece KLD ve L2N yöntemlerinin deprem merkezine en fazla 150 km uzaklıkta olan istasyonlar için sismik hareketliliğin neden olduğu bozulmayı seçebildiği görülmüştür.

Keywords: *İyonküre, Toplam Elektron İçeriği, deprem, jeomanyetik bozulma.*

ABSTRACT

Earth's ionosphere is a dominant factor in space weather and the variability of the ionosphere is important for the ionospheric physics and radio communications. The characterizing property of the ionosphere is the electron density distribution that shows variation as a function of height, latitude, longitude, and geomagnetic, solar and seismic activities. An important measurable quantity about the electron density is the Total Electron Content (TEC), which is proportional to the total number of electrons on a line crossing the atmosphere. In this study, TEC obtained for eleven Turkish National Permanent GPS Network (TNPGN-Active) Global Positioning System (GPS) stations located in Turkey are compared with each other using the Cross Correlation Coefficient (CCC), Symmetric Kullback-Leibler Distance (KLD) and L2-Norm (L2N) for quiet days of the ionosphere, during severe geomagnetic storms, and earthquakes having different magnitudes. It is observed that only KLD and L2N can differentiate the seismic activity from the geomagnetic disturbance and quiet ionosphere if the stations are in a radius of 340 km. When TEC for each station is compared with an average quiet day TEC for all periods using CCC, KLD and L2N, it is observed that, again, only KLD and L2N can distinguish the approaching seismicity for stations that are within 150 km radius to the epicenter.

Anahtar Kelimeler: *Ionosphere, Total Electron Content, Earthquake, Geomagnetic Disturbance.*

* S. Karatay
e-posta: skaratay@kastamonu.edu.tr

GİRİŞ

İyonküre, Atmosfer'in yaklaşık olarak 50 ile 1000 km arasındaki yükseklik alanında yer alan ve Güneş'ten gelen ışınımlar ve kozmik ışınlar ile şekillenen doğal plazma ortamıdır. Güneş'ten gelen ışınımlar, iyonküre içindeki atom ve molekülleri iyonlaştırarak pozitif yüklü iyonlar ile serbest elektronları oluşturmaktadır. İyonküreyi karakterize eden temel parametre, Güneş işlekliği, jeomanyetik işleklik, konum, zaman ve sismik hareketlilikle de değişimler gösteren elektron yoğunluğudur. İyonküreyi karakterize eden ve elektron yoğunluğunun bir fonksiyonu olan bir diğer parametre ise Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir ve uydu ve alıcı arasındaki bir sinyal yolu boyunca hesaplanan toplam elektron miktarı olarak ifade edilir, TEİ'nin birimi TECU olup, 1 TECU metrekarede 10^{16} elektrona eşittir (Arikan vd., 2003; Nayir, 2007; Nayir vd., 2007). İyonküredeki değişimler ve bozulmalar, TEİ'nin hesaplanması ve görüntülenmesi ile önemli ölçüde incelenebilir. TEİ elde etmek için yer tabanlı ve uydu tabanlı birçok teknik bulunur. Son yıllarda özellikle Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS), yeryüzüne konumlanmış olan alıcıları ile birlikte TEİ hesaplamada ve iyonküresel değişimleri sergilemede etkili çözümler sağlar.

İyonkürenin zamansal ve uzamsal değişimleri genel olarak Yer'in günlük ve yıllık rotasyonuna ve manyetik alan çizgilerinin dağılımına bağlıdır. Yer'in manyetik alanı, çok nadir olarak bir jeomanyetik fırtına yok ise sakindir. Bu yönelimler ve periyodik değişimler, *"sakin iyonküre"* olarak bilinen iyonküreyi biçimlendirir (Rishbeth ve Garriot, 1969). Çok uzun süreli gözlemler sonucunda, Güneş'teki değişimler ile jeomanyetik ve sismik hareketliliğin, iyonkürenin sakin olduğu dönemlerde bazı sapmalara neden olduğu görülmüştür. Bu sapmalar, iyonküre içinde bozulmalar olarak adlandırılır. Eğer Yer'in manyetik alanındaki sapmalara bağlı olan jeomanyetik bozulmaları ölçeklendirebilmek için birçok indis geliştirilmiştir. Literatürdeki birçok çalışmada jeomanyetik fırtınaların iyonküredeki elektron yoğunluğunda ve TEİ'de bozulmalara neden olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte son yıllarda, sismik hareketliliğin Litosfer, Troposfer ve iyonküre ile bağlaşımı sonucunda elektromanyetik sinyaller, Yer'in elektrik ve manyetik yapısı ile Atmosfer'in kimyasal yapısı üzerinde önemli ölçüde değişimlere neden olduğu bulunmuştur (Rishbeth ve Garriot, 1969; Zhang ve Xiao, 2000; Vlasov vd., 2003; Biqiang vd., 2007). Bu çalışmalarda, sismik hareketliliğe bağlı olarak meydana gelen elektromanyetik anormallikleri ve iyonküreye etkilerini ortaya çıkarmak için birçok teori de geliştirilmiştir. Literatürdeki bu çalışmalara göre, büyük depremlerden önce özellikle TEİ, iyon sıcaklığı (T_i) ve F2-bölgesi kritik frekansı (foF2) gibi iyonküre parametrelerinde büyük ölçüde bozulmalar meydana gelmektedir. Literatürde, iyonküre parametreleri üzerinde anormallikler yaratan iyonküresel bozulmaları inceleyen teknikler genel olarak şu şekilde sınıflandırılabilir: İlinti Analizi (Liu vd., 2000; Chuo vd., 2001; Liu vd., 2004; Pulinets, 2004; Pulinets vd., 2004; Pulinets vd., 2005; Pulinets vd., 2006;), Çeyrekler Arası Alan Analizi (Chuo vd., 2001; Liu vd., 2004; Lazo vd., 2004; Zhang vd., 2004), TEİ Farkı Analizi (Plotkin, 2003), İyonküresel Düzeltme Analizi (Trigunait vd., 2004), Radyo Yarısaydamlık Metodu (Smirnova ve Smirnov, 2005; Bondur ve Smirnov, 2006; Smirnova ve Smirnov, 2007) ve Bağıl Sapma Analizi (Kouris ve Fotiadis, 2002; Kouris vd., 2006). Bu sınıflamayla sıralanan bu tekniklerin hepsi iyonküre parametreleri üzerinde ya güçlü bir jeomanyetik fırtınanın yaşandığı dönem süresince ya da büyüklüğü 6'dan fazla olan deprem periyotları boyunca uygulanmıştır. Bu nedenle hâlâ, büyük jeomanyetik fırtınalar veya sismik hareketliliğin yarattığı bozulmalar için bir alarm sinyali oluşturabilmek adına gerçekçi ve geçerli istatistiksel yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

İstatistikte ve bilgi teorisinde Kullback-Leibler Iraksaklığı, iki Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) arasındaki benzerlikleri veya farklılıkları ölçmek için kullanılır (Hall, 1987; Inglada, 2003; Bratsolis ve Sigelle, 2003; Chiang ve Braatz, 2003; Rached vd., 2004; Cover ve Thomas, 2006; Karatay vd., 2010; Karatay vd., 2017). Benzer olarak, L2-Normu da iki vektör arasındaki mesafesi tanımlamak için kullanılır (Kreyszig, 1998; Arikan vd., 2009; Karatay vd., 2010; Karatay vd., 2017). Bu iki istatistiksel yöntem dışında, Çapraz İlinti yöntemi de, iki dağılım arasındaki ilişkiyi/ilintiyi ortaya koymak için sık kullanılan istatistiksel bir yöntemdir (Weisberg, 2005). Bu çalışmada, YKS istasyonlarından elde edilen TEİ'nin değişkenliğini incelemek için, iyonkürenin jeomanyetik açıdan bozulmalı ve sakin durumları da karşılaştırılarak, Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (KLD), L2-Normu (L2N) ve Çapraz İlinti Katsayısı (ÇİK) yöntemi de veri setleri üzerinde kullanılmıştır. Türkiye'de Kuzey Anadolu Fay hattında (KAF) meydana gelen benzer jeofiziksel özelliklere sahip iki deprem seçilmiştir. Harita Genel Komutanlığı tarafından Türkiye üzerine düzgün olarak yerleştirilmiş TUSAGA-Aktif YKS istasyonlarından her bir depremden 10 gün öncesi

ve sonrası günler için TEİ kestirimleri elde edilmiştir. TUSGA-Aktif TEİ kestirimleri Türkiye için iyonkürenin jeomanyetik ve sismik açıdan sakin olduğu günler ile karşılaştırılmıştır.

ANALİZ YÖNTEMLERİ

Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) ile TEİ hesaplamada, uydu ve alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca hesaplanan serbest elektron miktarına Eğik-TEİ (STEC-Slant Total Electron Content) denilmektedir. Bir YKS alıcısının yerel zenit doğrultusunda hesaplanan TEİ değeri ise Dik-TEİ (VTEC-Vertical Total Electron Content) ile ifade edilmektedir (Arikan vd., 2003; Nayir, 2007; Nayir vd., 2007). Belli bir zaman dilimi içinde hesaplanan VTEC verileri vektörüyle ifade edilebilir:

$$\boldsymbol{x}_{u;d} = \left[x_{u;d}(1) \dots \dots \dots \; x_{u;d}(n) \dots \dots \dots \; x_{u;d}(N)\right]^T \quad (1)$$

Burada u, alıcı numarasını; , toplam ölçüm sayısını; , örnek numarasını ; ise matris devriğini göstermektedir. Veri setlerinde farklı mevsimlerde, yıllarda ve günlerde hesaplana TEİ değerleri karşılaştırılmak için düzgelenmiştir (normalize). Bir istasyonun günündeki vektörünün günlük deneysel Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) (Karatay vd., 2010):

$$\widehat{\boldsymbol{P}}_{u;d} = \boldsymbol{x}_{u;d} \sum_{n=N_i}^{N_s} x_{u;d}(n) \quad (2)$$

şeklinde yaklaştırılmıştır. Bir istasyonunun sakin günler zaman aralığındaki toplam kadar gününden elde edilen Ortalama Değer Sakin Gün (ODSG),vektörü Eşitlik 3'teki gibi tanımlanmıştır (Karatay vd., 2010):

$$\boldsymbol{x}_{u;d_i-d_s} = (1/N_d) \sum_{d_n=d_i}^{d_s} x_{u;d_n} \quad (3)$$

Burada, iyonkürenin sakin gün zaman aralığında başlangıç gününü, bitiş gününü temsil etmektedir. Eşitlik 3 ile ifade edilen ODSG vektörünün düzgelenmiş değeri de olarak elde edilmiştir.

Çapraz İlinti Katsayısı Yöntemi

İlinti, iki bazen de daha çok sayıda değişken arasındaki ilişkiyi gösterir. İlişkinin miktarı bir sayı ile belirtilir. Bu sayıya ilinti katsayısı denir (Weisberg, 2005). Seçilen birinci istasyona ait günlük VTEC verileri vektörüyle, ikinci istasyona ait günlük VTEC verileri vektörüyle tanımlanırsa, başlangıç bitiş örnek numarası ve toplam örnek sayısı olmak üzere bu iki istasyonun gününe ait günlük çapraz ilinti fonksiyonu , aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir:

$$r_{u;v;d} = \left(1/N_T \sigma_{u;d}\, \sigma_{v;d}\right) \sum_{n=N_i}^{N_s} \left(x_{u;d} - \overline{\boldsymbol{x}}_{u;d}\right)\left(x_{v;d} - \overline{\boldsymbol{x}}_{v;d}\right) \quad (4)$$

Burada ve sırasıyla gün için örnek üzerinden ve vektörlerinin ortalama değerini ve ise bu vektörlerin standart sapmasını vermektedir. Bir istasyon için Eşitlik 3 ile tanımlanan ODSG vektörünün OYF vektörü ve günü arasındaki ÇİK fonksiyonu ile; istasyonunun ve . ardışık günleri arasındaki Çapraz İlinti Katsayıları da ile hesaplanmıştır.

Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (KLD) Yöntemi

Olasılık ve bilgi teorisinde Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (KLD), iki olasılık dağılımı arasındaki benzerlikleri ve farklılıkları ölçmek için kullanılır. Bir "doğru" olasılık dağılımından bir *"tercihli"* olasılık dağılımının farkının bir ölçümüdür. Doğru olasılık dağılımı veriyi, gözlemi veya tam olarak hesaplanmış bir olasılık dağılımı; tercihli olasılık dağılımı ise bir teoriyi, bir modeli ya da bir yaklaşımı temsil eder. Eşitlik 2 ile ifade edilen OYF kullanılarak ve istasyonları için 'den 'ye ve 'den 'ye olan Kullback-Leibler Iraksaklığı ():

$$KLM\left(\widehat{\boldsymbol{P}}_{u;d} \backslash \widehat{\boldsymbol{P}}_{v;d}\right) = \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{P}_{u;d}(n) ln\left[\hat{P}_{u;d}(n)/\hat{P}_{v;d}(n)\right] \quad (5)$$

$$KLM\left(\left(\widehat{\boldsymbol{P}}_{v;d} \backslash \widehat{\boldsymbol{P}}_{u;d}\right)\right) = \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{P}_{v;d}(n) ln\left[\hat{P}_{v;d}(n)/\hat{P}_{u;d}(n)\right]$$

eşitlikleri ile ifade edilir (Hall, 1987; Inglada, 2003; Bratsolis ve Sigelle, 2003; Chiang ve Braatz, 2003; Rached vd., 2004; Cover ve Thomas, 2006; Karatay vd., 2010; Karatay vd., 2017). Burada, başlangıç ve bitiş örnek numarasını göstermektedir. Eşitlik 5'te verilen fonksiyonları kullanılarak istasyonlar arasındaki simetrik Kullback-Leibler Mesafesi ():

$$KLD\left(\widehat{\boldsymbol{P}}_{u;d}; \widehat{\boldsymbol{P}}_{v;d}\right) = KLM\left(\widehat{\boldsymbol{P}}_{u;d} \backslash \widehat{\boldsymbol{P}}_{v;d}\right) + KLM\left(\widehat{\boldsymbol{P}}_{v;d} \backslash \widehat{\boldsymbol{P}}_{u;d}\right) \quad (6)$$

eşitliği ile ifade edilir (Hall, 1987; Inglada, 2003; Bratsolis ve Sigelle, 2003; Chiang ve Braatz, 2003; Rached vd., 2004; Cover ve Thomas, 2006; Karatay vd., 2010; Karatay vd., 2017). Bir istasyonunun ortalama değer sakin gün vektörü ile günü arasındaki fonksiyonu ile tanımlanmıştır. Ardışık ve günleri arasındaki simetrik Kullback-Leibler Mesafesi de fonksiyonu ile elde edilmiştir.

L2-Normu (L2N) Yöntemi

L2-Normu (), iki vektör arasındaki mesafeyi ölçmek için kullanılır. L2-Mesafesi metrik bir ölçektir (Kreyszig, 1998; Arikan vd., 2009; Karatay vd., 2010; Karatay vd., 2017). Eşitlik 2 ile ifade edilen OYF kullanılarak ve istasyonları için 'den 'ye L2-Normu Eşitlik 7 ile ifade edilir (Karatay vd., 2010; Karatay vd., 2017):

$$L2N\left(\widehat{\boldsymbol{P}}_{u;d}\backslash\widehat{\boldsymbol{P}}_{v;d}\right)=\sqrt{\sum_{n=N_i}^{N_s}\left(\hat{P}_{u;d}(n)-\hat{P}_{v;d}(n)\right)^2} \quad (7)$$

Burada başlangıç ve bitiş örnek numarasıdır. Bir istasyonun ortalama değer sakin gün vektörü ile günü arasındaki L2-Normu, fonksiyonu ile; ardışık ve günleri arasındaki L2-Normu da, fonksiyonu ile tanımlanmıştır.

SONUÇLAR ve TARTIŞMA

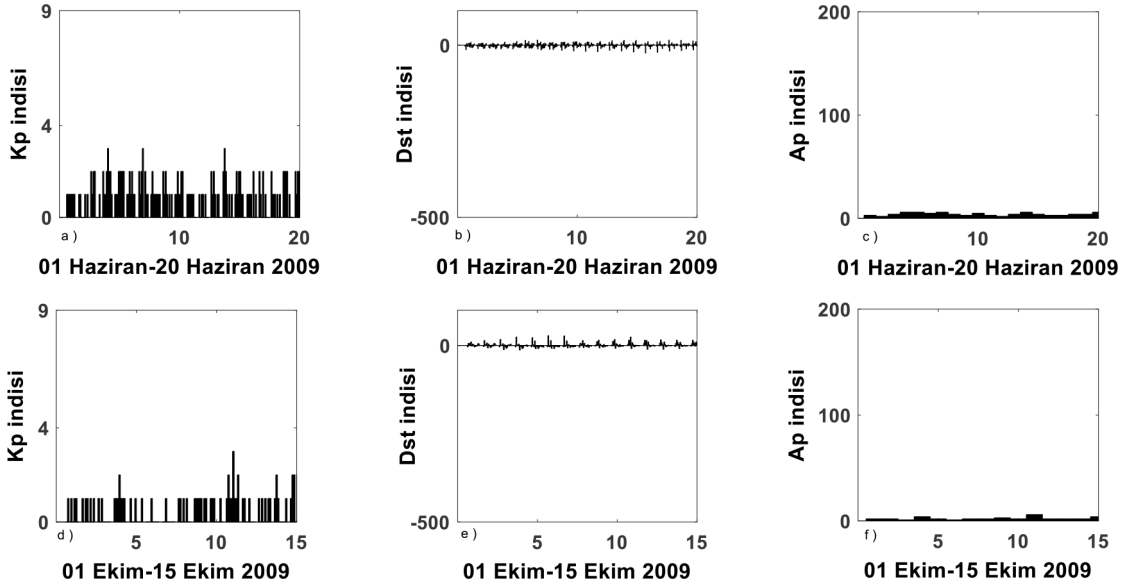
İkinci bölümde izah edilen yöntemler, Türkiye'de Kuzey Anadolu Fay Hattı'nda meydana gelmiş iki deprem için istasyonlar arası çaprazlama uygulaması (Grup-I), Ortalama Değer Sakin Gün uygulaması (Grup-II) ve ardışık günler uygulaması (Grup-III) olmak üzere üç uygulama grubu içinde kullanılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan istasyonlar, daha önce Japonya ve Çin depremleri ele alınarak yapılan çalışmada (Karatay vd., 2010) ortaya konulan sonuçlar doğrultusunda deprem merkezlerine 427 km mesafeye kadar seçilmiştir. Çalışmanın amacı için Türkiye'de meydana gelen farklı büyüklükteki iki deprem seçilmiştir. Her iki deprem de Kuzey Anadolu Fay (KAF) hattı üzerinde bulunup benzer jeofiziksel özellikler taşımaktadır. Depremlerin tarihi, oluş zamanı, konumu (°K-°D), büyüklüğü (M-Richter) ve derinliği (z-km) Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 1'de E1 ve E2 olarak temsil edilen depremler sırasıyla 30.07.2009 tarihli Çağlayan, Erzincan (www.koeri.boun.edu.tr) ve 08.08.2009 tarihli Yenice, Çanakkale (http://earthquake.usgs.gov/regional/world) depremidir. Deprem dönemi günleri için her bir depremden on gün öncesi ve sonrası olmak üzere toplam yirmi bir günlük zaman aralığı seçilmiştir. Tüm şekiller üzerinde, depremin olduğu 11. gün mavi bir ok ile gösterilmiştir.

Türkiye'de deprem öncesi sismik hareketliliğin iyonküre üzerindeki etkilerini inceleyebilmek için, iyonkürenin Güneş'te meydana gelen hareketliliğe bağlı olarak jeomanyetik hareketliliğin yaşanmadığı sakin günler zaman aralığı da ele alınmıştır. TEİ kestirimleri için kullanılan Türkiye'deki YKS istasyon ağı Mayıs 2009 tarihinden itibaren işlevsellik kazanmıştır. 2009 yılı jeomanyetik olarak bozulmanın yaşanmadığı oldukça sakin bir yıl olarak geçmiştir. Bu nedenle karşılaştırmalar sadece deprem dönemi ve sakin dönem olmak üzere iki zaman aralığı için yapılabilmiştir. Sakin günler zaman aralığı seçilirken jeomanyetik hareketliliği ölçeklendiren Dst, Kp ve Ap indisleri (http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices, http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/, http://www.cbk.waw.pl/rwc/idce.html) web sitelerinden elde edilmiştir. Sakin günler zaman aralığı için (SD_1) 01 Ekim-15 Ekim 2009 tarihleri arasındaki günler, ODSG için (SD_2) de 01-20 Haziran 2009 tarihleri arasındaki günler kullanılmıştır. Bu iki zaman aralığında, seçilen deprem bölgelerinde önemli sayılabilecek bir sismik hareketlilik yoktur. Bu iki sakin döneme ait Kp-indisi, Dst-indisi ve Ap-indisi değişimleri Şekil 1'de verilmiştir. Bu çalışmada, Harita Genel Komutanlığı tarafından Türkiye üzerine düzgün konumlandırılmış TUSAGA Aktif YKS istasyonlarından elde edilen IONOLAB-TEİ kestirimleri kullanılmıştır (Arikan vd., 2003; Nayir vd., 2007; http://www.ionolab.org). Kullanılan istasyonların ve seçilen depremlerin konumları Şekil 2'de verilmiştir. Şekil 2'de deprem merkezleri "kırmızı yıldız" ile YKS istasyonları "mavi nokta" ile gösterilmiştir. İstasyonların birbirlerine olan uzaklıkları, 69 km'den 441 km'ye kadar değişmektedir.

Birinci grup uygulamada, Eşitlik 4 ile tanımlanan ÇİK yöntemi, Eşitlik 6 ile tanımlanan KLD yöntemi ve Eşitlik 7 ile tanımlanan L2N yöntemi, E1 depreminde bayb, bing, erzi, kays, rhiy ve E2 depreminde ayvl, cana, datc, tekr, usak, yenc istasyonlarının TEİ değer-

Çizelge 1. Depremlerin konum, zaman, büyüklük ve derinlik göstergesi.
Table 1. Geographic locations, times, magnitudes and depths of the earthquakes.

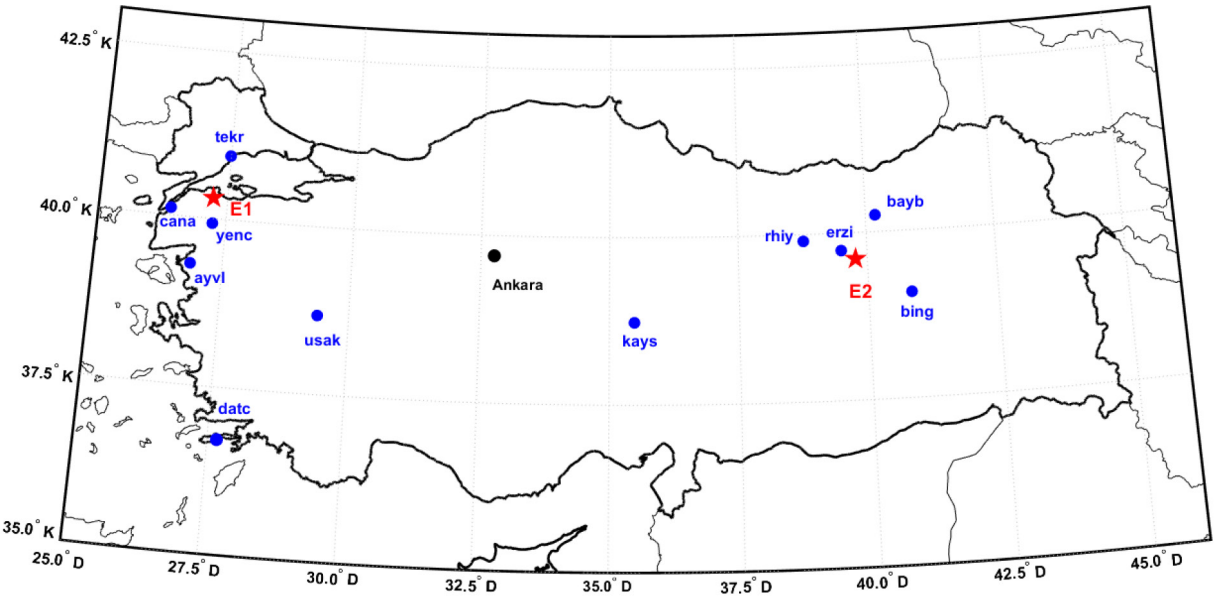
YER	Tarih	Saat	Enlem (°K)	Boylam (°D)	M (Richter)	z (km)
E1-Erzincan	30.07.2009	10 37	39.6	40.3	5	5
E2-Yenice	08.08 2009	04 52	40.3	27.2	4.2	10



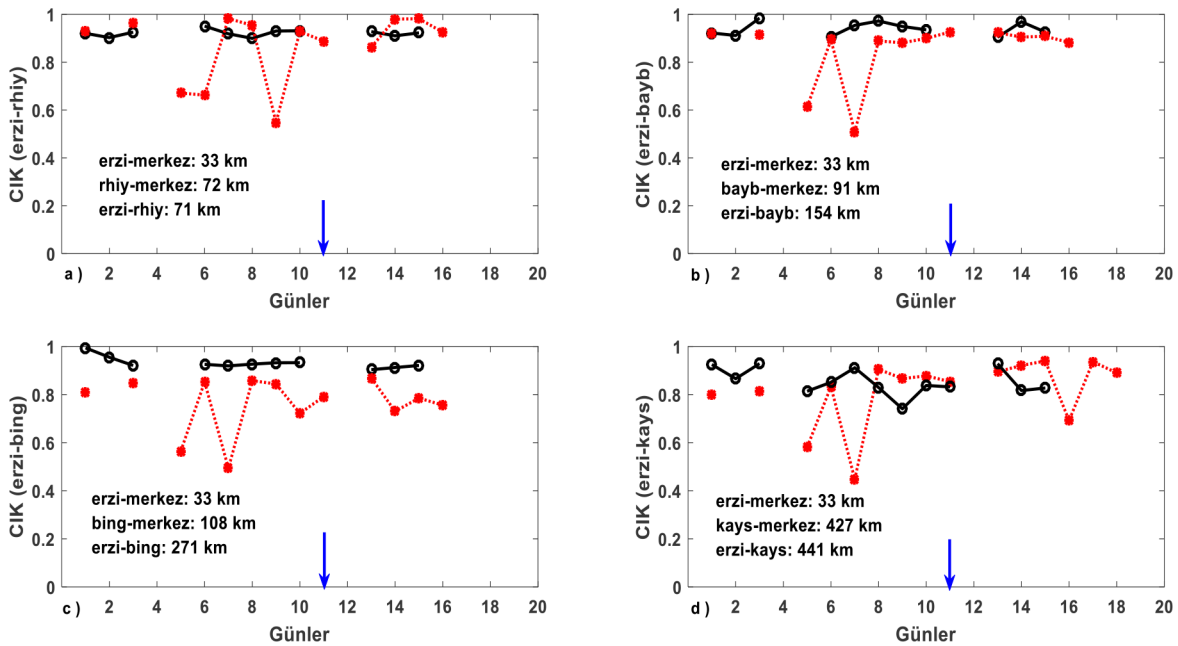
Şekil 1. Günlük jeomanyetik hareketlilik indisleri; SD2 için a) Kp indisi, b) Dst indisi, c) Ap indisi; SD1 için d) Kp indisi, e) Dst indisi, f) Ap indisi.

Figure 1. Daily geomagnetic indices; a) Kp index, b) Dst index, c) Ap index for SD2; d) Kp index, e) Dst index, f) Ap index for SD1.

leri arasında uygulanmıştır. Bu grup çalışmaya göre her iki depremde kullanılan istasyonların çaprazlama ÇİK değerleri sakin günlerde +1'e yakın değişirken deprem günlerinde +0.5 değerine kadar düşmüştür. Literatürde (Pulinets, 2004; Pulinets vd., 2004; Pulinets vd., 2005; Pulinets vd., 2006) eğer iki veri seti arasındaki ilinti katsayısı 0.9'dan büyük ise, bu iki veri setinin yüksek ilişkili olduğu kabul edilmiştir. Deprem gününden önce bu ilişkinin zayıflayarak 0.9'un altındaki değerlere ulaştığı ve deprem öncesi anomalilere işaret ettiği söylenmiştir. Bu nedenle bu çalışmada da ÇİK yöntemi için eşik değer 0.9 olarak kabul edilmiştir. ÇİK yöntemi bu çalışmada Türkiye üzerinde meydana gelen bu iki depremde, deprem günlerini ayırabilmiştir. Yine (Karatay vd., 2010) çalışmasında, KLD ve L2N yöntemlerinin, büyüklüğü 5.9 ile 8.3 arasında değişen depremler için deprem merkezine en fazla 340 km uzaklıkta bulunan istasyonlar için sismik anormalliği ayırabilen yöntemler olduğu bulunmuştur. İstasyonların deprem dönemleri, jeomanyetik açıdan sakin bir gün ile karşılaştırıldığında ise deprem merkezine 150 km çapta bulunan istasyonlardaki sismik anormalliği güçlü ölçüde ortaya çıkaran yöntemler olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada da istasyonların deprem dönemi çaprazlama KLD değerlerinin sakin günlerde elde edilen değerlerden 10 kat büyük olduğu gözlenmiştir. İstasyonlar arası L2N değerleri deprem dönemlerinde ve sakin dönemlerde birbirine yakın değişmiştir. L2N yöntemi, deprem dönemi ile sakin dönemde istasyonlar arasındaki farkı KLD yöntemi kadar iyi ölçememiştir. Şekil 3'te bu uygulamaya örnek olarak sırasıyla E1 depremi için deprem merkezine en yakın istasyon olan merkez istasyon ile diğer istasyonlar arasındaki deprem dönemi ve sakin dönem ÇİK değerleri verilmiştir. Deprem günlerinde ilintinin zayıf, sakin günlerde ise ilintinin yüksek olduğu Şekil 3'ten görülmektedir. İstasyonlar arasındaki mesafe arttıkça ve deprem gününe yaklaştıkça ilintinin azaldığı yine Şekil 3'ten gözlenmektedir. Şekil 4'te ise Grup-I uygulamaya örnek olarak sırasıyla E1 depreminde ve sakin günlerde istasyonlar arasındaki KLD değerleri verilmiştir. Her iki depremde de KLD değerlerinin sakin günlerden çok büyük olduğu görülmektedir. Özellikle istasyonların merkez istasyona olan uzaklıkları ve depremin büyüklüğü arttıkça deprem günlerinde bu farkın daha da arttığı gözlenmektedir. Birbirine yakın olan istasyonlar arasında deprem günlerinde KLD değerleri daha küçük olduğu görülmektedir. Şekil 5'te Grup-I uygulamaya örnek olarak E1 depremindeki ve sakin günlerdeki L2N değerleri verilmiştir. Deprem günlerindeki L2N değerlerinin sakin günlere yakın değiştiği gözlenmektedir. E1 deprem için L2N değerlerinin deprem ile sakin günler arasındaki farkın KLD değerleri kadar belirgin olmadığı Şekil 5'ten gözlenmektedir.

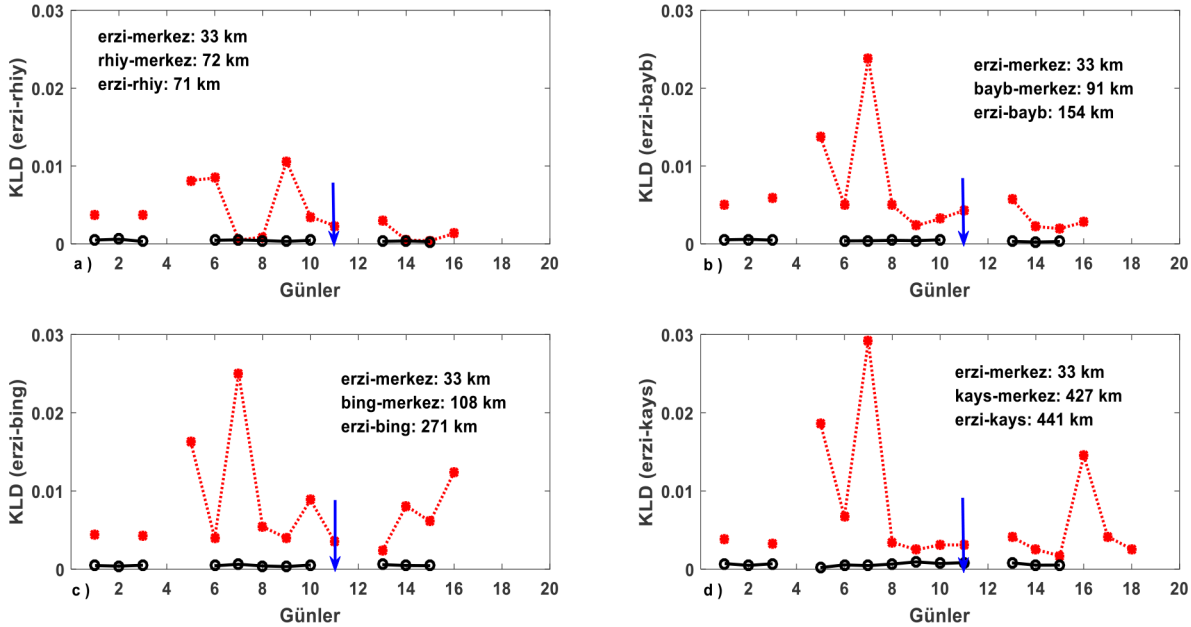


Şekil 2. Çalışma kapsamında seçilen depremlerin merkezleri ve TUSAGA-Aktif YKS istasyonları.
Figure 2. The locations of the earthquakes and the TNPGN-Active GPS stations chosen for the study.



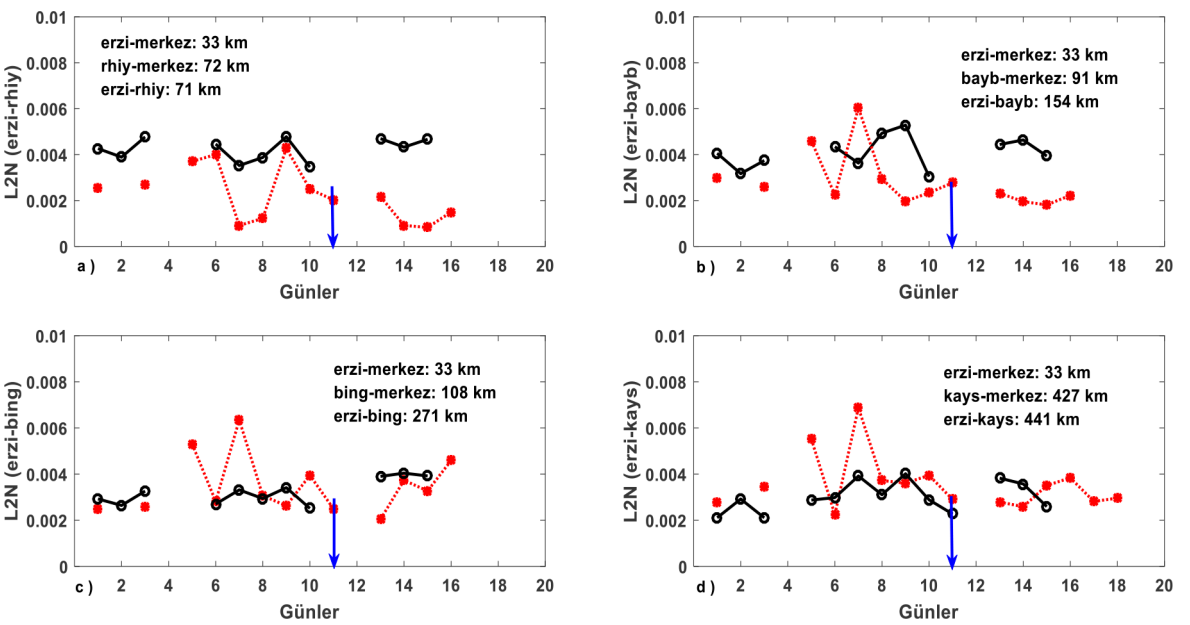
Şekil 3. E1 depremi periyodu ve sakin günler periyodu arasındaki ÇİK değerleri: a) erzi-rhiy, b) erzi-bayb, c) erzi-bing, d) erzi-kays istasyonları arasında. Deprem periyodu " kırmızı nokta" ile, sakin günler periyodu "siyah daire" ile, depremin olduğu gün ise "mavi ok" ile gösterilmiştir.
Figure 3. CCC values between E1 earthquake days period and quite days period for a) erzi-rhiy, b) erzi-bayb, c) erzi-bing, d) erzi-kays. Earthquake days, quiet days periods and the earthquake day are demonstrated with "red dot", "black circle" and "blue arrow", respectively.

İkinci grup uygulamada fonksiyonu ile tanımlanan ÇİK yöntemi, ile tanımlanan KLD yöntemi ve fonksiyonu ile tanımlanan L2N yöntemi, çalışma kapsamında kullanılan her bir YKS istasyonun ODSG TEİ vektörü ile deprem dönemi ve sakin dönem günlerinde elde edilen TEİ değerleri arasında uygulanmıştır.



Şekil 4. E1 depremi periyodu ve sakin günler periyodu arasındaki KLD değerleri: a) erzi-rhiy, b) erzi-bayb, c) erzi-bing, d) erzi-kays istasyonlarıarasında. Deprem periyodu " kırmızı nokta" ile, sakin günler periyodu "siyah daire" ile, depremin olduğu gün ise "mavi ok" ile gösterilmiştir.

Figure 4. KLD values between E1 earthquake days period and quite days period for a) erzi-rhiy, b) erzi-bayb, c) erzi-bing, d) erzi-kays. Earthquake days, quiet days periods and the earthquake day are demonstrated with "red dot", "black circle" and "blue arrow", respectively.

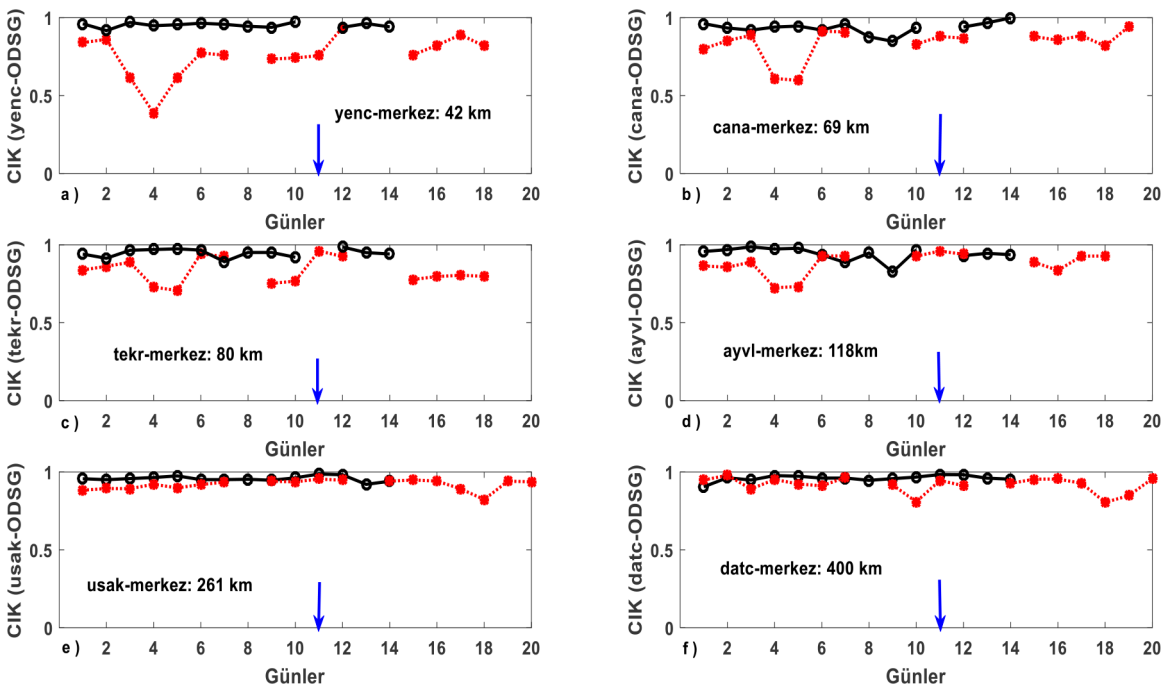


Şekil 5. E1 depremi periyodu ve sakin günler periyodu arasındaki L2N değerleri: a) erzi-rhiy, b) erzi-bayb, c) erzi-bing, d) erzi-kays istasyonları arasında. Deprem periyodu " kırmızı nokta" ile, sakin günler periyodu "siyah daire" ile, depremin olduğu gün ise "mavi ok" ile gösterilmiştir.

Figure 5. L2N values between E1 earthquake days period and quite days period for a) erzi-rhiy, b) erzi-bayb, c) erzi-bing, d) erzi-kays. Earthquake days, quiet days periods and the earthquake day are demonstrated with "red dot", "black circle" and "blue arrow", respectively.

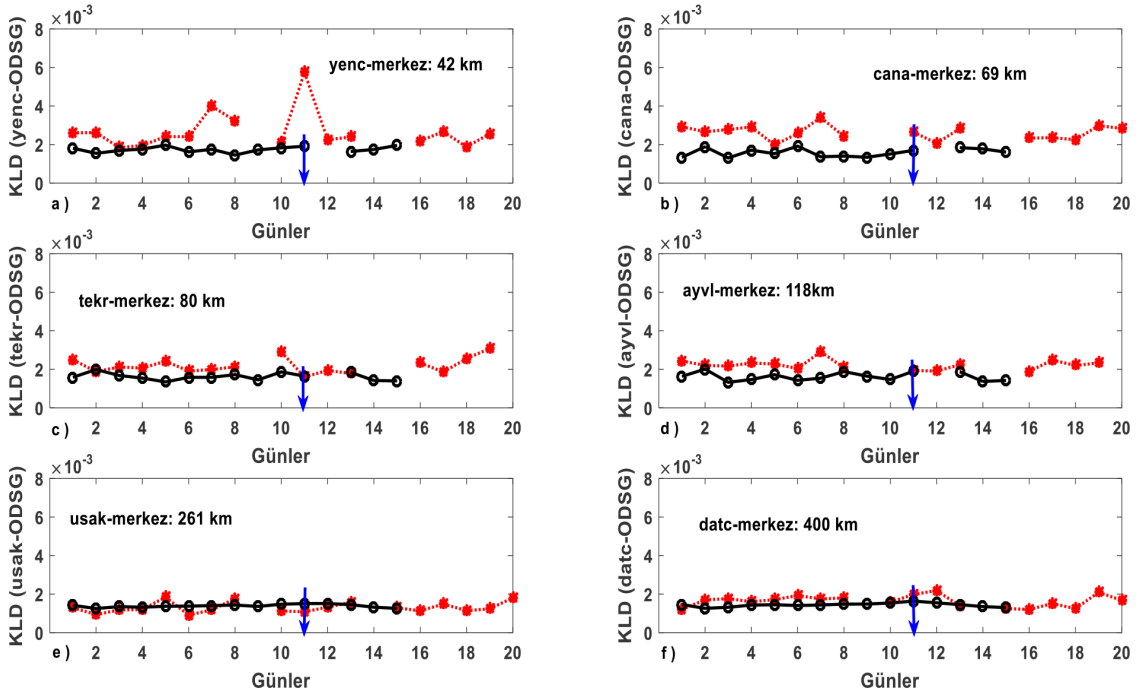
Bu grup çalışmayla, hem ODSG-deprem hem de ODSG sakin eşleşmesi için ÇİK değerlerinin 0.8 ile 1 arasında değiştiği gözlenmiştir. Deprem öncesi bazı günlerde ise ÇİK değerlerinin 0.6'ya kadar düştüğü gözlenmiştir. KLD ve L2N yöntemlerinin bu uygulamada paralel sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür. ODSG-deprem eşleşmesinin KLD ve L2N değerlerinin, ODSG-sakin eşleşmesi değerlerinden çok daha büyük değiştiği gözlenmiştir. KLD ve L2N değerlerinde özellikle ODSG-deprem eşleşmesinde ani artışlar gözlenmiştir. Şekil 6'da, kullanılan her bir YKS istasyonu için E2 depremi ve sakin günler ile ODSG arasındaki ÇİK değerleri gösterilmiştir. ÇİK yönteminin deprem günlerini ayırmada bu uygulama için ayırt edici bir yöntem olmadığı Şekil 6'dan görülmektedir. Şekil 7'de yine E2 depremi ve sakin günler ile ODSG arasındaki KLD değerleri verilmiştir. Deprem merkezine yakın istasyonlarda deprem-ODSG eşleşmesi değerlerinin sakin-ODSG eşleşmesi değerlerinden büyük olduğu, istasyonların deprem merkezine uzaklığı arttıkça bu eşleşmelerin birbirine çok yakın değerlerde olduğu gözlenmektedir. Depremin büyüklüğü arttıkça deprem-ODSG eşleşmesi değerlerinin de arttığı görülmektedir. Şekil 8'de ise, E2 depremi ve sakin günler ile ODSG arasındaki L2N değerleri verilmiştir. Deprem merkezine yakın istasyonlarda özellikle deprem gününden önceki günlerde deprem-ODSG eşleşmesi değerlerinin sakin-ODSG eşleşmesi değerlerinden büyük olduğu görülmektedir. Deprem merkezine 180'den uzak olan istasyonların deprem-ODSG eşleşmesi ile sakin-ODSG eşleşmesi değerlerinin birbirine çok yakın olduğu yine Şekil 8'den de görülebilmektedir.

Üçüncü grup uygulamada fonksiyonu ile tanımlanan ÇİK yöntemi, fonksiyonu ile tanımlanan KLD yöntemi ve fonksiyonu ile tanımlanan L2N yöntemi, çalışma kapsamında kullanılan her bir YKS istasyonun ardışık deprem günleri ve ardışık sakin günleri arasında uygulanmıştır. Bu uygulamayla, ardışık sakin günler arasındaki ÇİK değerlerinin +1'e yakın değiştiği, ardışık deprem günlerinde ise ÇİK değerlerinin +0.2'ye kadar düşerek zayıf ilinti sergilediği gözlenmiştir. Ardışık deprem günleri için elde edilen KLD değerlerinin, ardışık sakin günler için elde edilen KLD değerlerinden yaklaşık olarak 10 kat büyük olduğu görülmüştür. Benzer olarak ardışık deprem günleri için elde edilen L2N değerlerinin, ardışık sakin günler için elde edilen



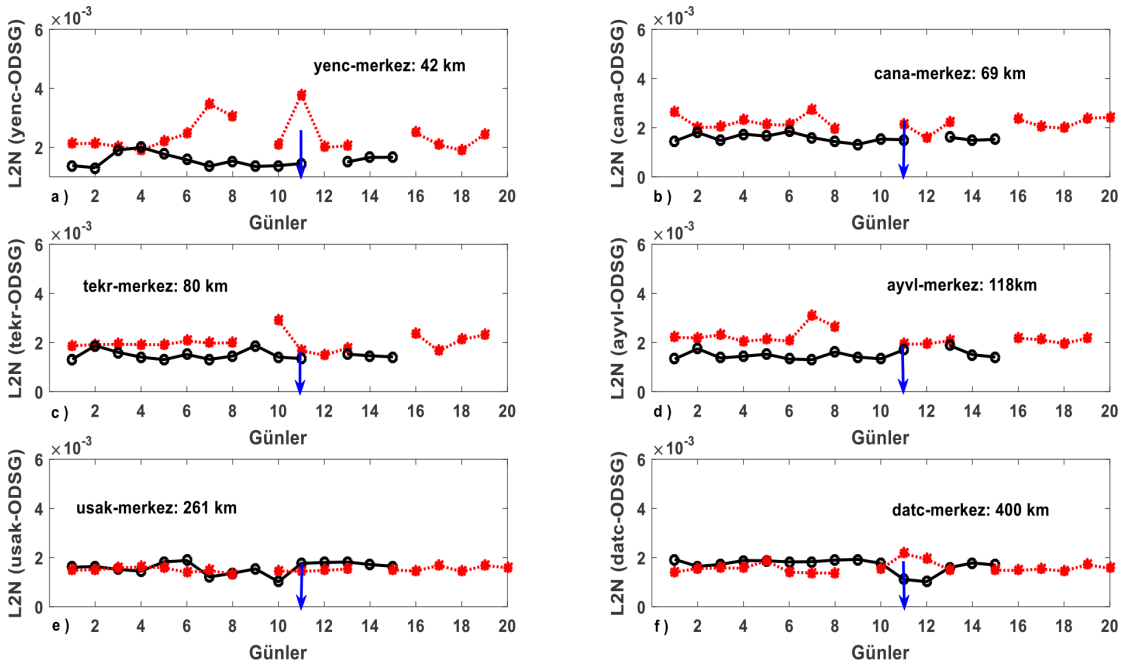
Şekil 6. E2 depremi ile ODSG ve sakin günler ile ODSG eşleşmeleri için ÇİK değerleri: a) yenc, b) cana, c) tekr, d) ayvl, e) usak, f) datc. Deprem periyodu " kırmızı nokta" ile, sakin günler periyodu "siyah daire" ile, depremin olduğu gün ise "mavi ok" ile gösterilmiştir.

Figure 6. CCC values between E2 earthquake days and Average Quite Day TEC (AQDT) for a) yenc, b) cana, c) tekr, d) ayvl, e) usak, f) datc. Earthquake days, quiet days periods and the earthquake day are demonstrated with "red dot", "black circle" and "blue arrow", respectively.



Şekil 7. E2 depremi ile ODSG ve sakin günler ile ODSG eşleşmeleri için KLD değerleri: a) yenc, b) cana, c) tekr, d) ayvl, e) usak, f) datc. Deprem periyodu " kırmızı nokta" ile, sakin günler periyodu "siyah daire" ile, depremin olduğu gün ise "mavi ok" ile gösterilmiştir.

Figure 7. KLD values between E2 earthquake days and Average Quite Day TEC (AQDT) for a) yenc, b) cana, c) tekr, d) ayvl, e) usak, f) datc. Earthquake days, quiet days periods and the earthquake day are demonstrated with "red dot", "black circle" and "blue arrow", respectively.



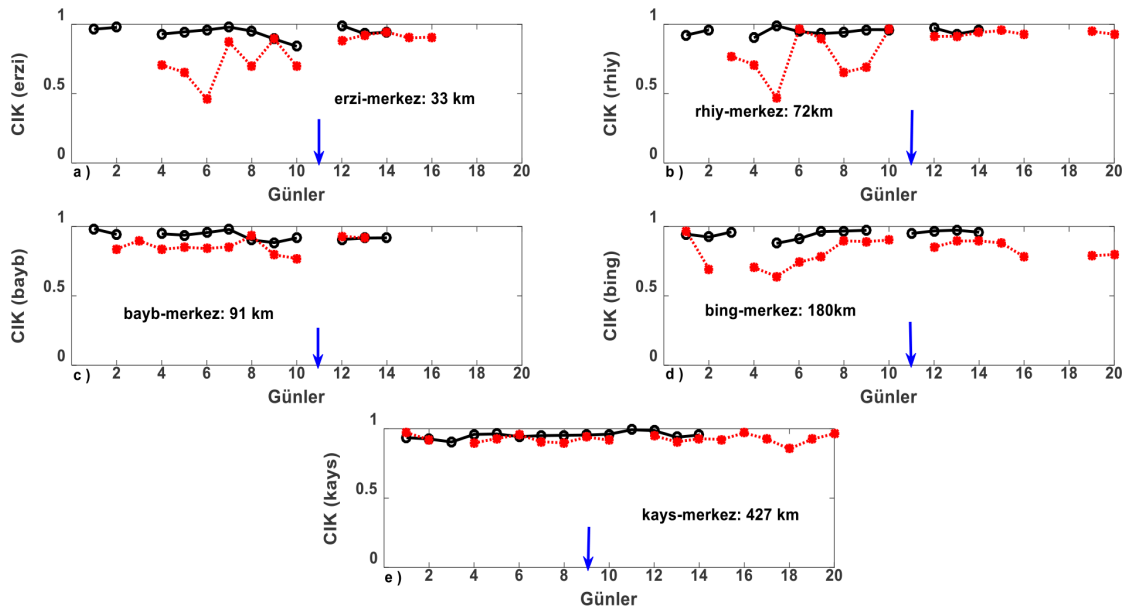
Şekil 8. E2 depremi ile ODSG ve sakin günler ile ODSG eşleşmeleri için L2N değerleri: a) yenc, b) cana, c) tekr, d) ayvl, e) usak, f) datc. Deprem periyodu " kırmızı nokta" ile, sakin günler periyodu "siyah daire" ile, depremin olduğu gün ise "mavi ok" ile gösterilmiştir.

Figure 8. L2N values between E2 earthquake days and Average Quite Day TEC (AQDT) for a) yenc, b) cana, c) tekr, d) ayvl, e) usak, f) datc. Earthquake days, quiet days periods and the earthquake day are demonstrated with "red dot", "black circle" and "blue arrow", respectively.

L2N değerlerinden yaklaşık olarak 2 kat büyük olduğu gözlenmiştir. Bu uygulamada her üç yöntemin de deprem günlerini, sakin günlerden ayırdığı gözlenmiştir. Bu uygulamaya bir örnek olarak Şekil 9'da, istasyonların deprem merkezlerine olan uzaklığına göre sırasıyla E2 depremi için ardışık deprem günleri ve ardışık sakin günler arasındaki ÇİK değerleri verilmiştir. Deprem merkezlerine yakın olan istasyonlarda ÇİK değerlerinin deprem öncesi günlerde zayıf ilintili olduğu görülmektedir. Deprem merkezlerine daha uzak olan kays (427 km) istasyonu için ilintinin benzer ve yüksek olduğu gözlenmektedir.

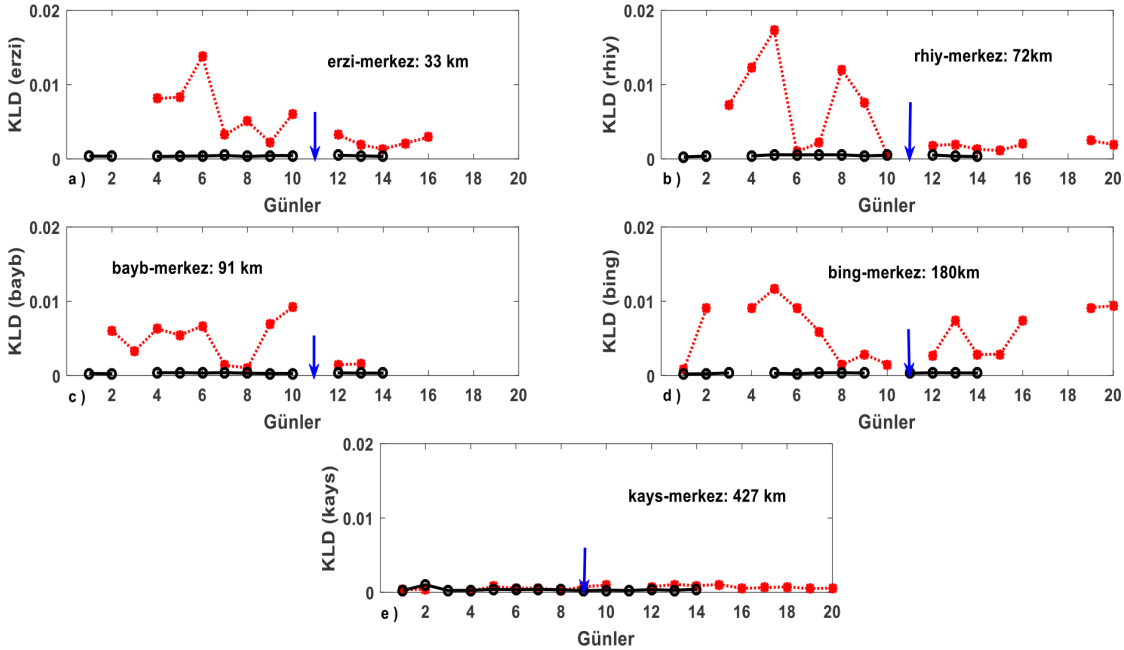
Şekil 10'da, istasyonların deprem merkezlerine olan uzaklığına göre E1 depremi için ardışık deprem günleri ve ardışık sakin günler arasındaki KLD değerleri verilmiştir. Ardışık deprem günlerindeki KLD değerlerinin ardışık sakin günlerdeki KLD değerlerinden çok büyük olduğu ve KLD yönteminin ardışık deprem günlerini 400 km'ye kadar ardışık sakin günlerden çok iyi ayırdığı Şekil 10'dan görülmektedir. Büyüklüğü daha fazla olan E1 depremi için KLD değerlerinin E2 depremi için elde edilen KLD değerlerinden özellikle deprem merkezine yakın istasyonlar için daha büyük olduğu sonucu bu grup uygulamada gözlenmiştir. Şekil 11'de ise yine istasyonların deprem merkezlerine olan uzaklığına göre E1 depremleri için ardışık depremindeki ardışık günler ve ardışık sakin günler arasındaki L2N değerleri verilmiştir. Her iki deprem için istasyonların deprem merkezine olan uzaklığı arttıkça, ardışık deprem günleri ve ardışık sakin günlerdeki L2N değerlerinin birbirine yaklaştığı bu grup çalışmada gözlenmiştir ve bu sonuç Şekil 11'de de görülmektedir. 180 km uzaklık sınırından sonra her iki dönem için elde edilen L2N değerlerin birbirine benzediği ve deprem merkezine yakın olan istasyonlarda ardışık deprem günleri ve ardışık sakin günler arasındaki farkın ise büyüdüğü Şekil 11'den gözlenmektedir.

Türkiye sismik bölgesi için yapılan bu çalışmada, Türkiye'de Kuzey Anadolu Fay Hattı'nda meydana gelen benzer jeolojik ve sismik özelliklere sahip iki deprem ve iki sakin dönem için Çapraz İlinti Katsayısı, simetrik Kullback-Leibler Mesafesi ve L2-Normu yöntemleri, TUSAGA-Aktif YKS istasyonlarından elde edilen günlük TEİ verileri üzerinde uygulanarak karşılaştırmalar yapılmıştır. İyonküredeki sismik hareketliliğin yarattığı bozulma etkilerini herhangi bir bozulmanın olmadığı günlerden ayırabilmek için istatistiksel yöntemler sakin günler için de uygulanmıştır. Türkiye için elde edilen bu bulgular



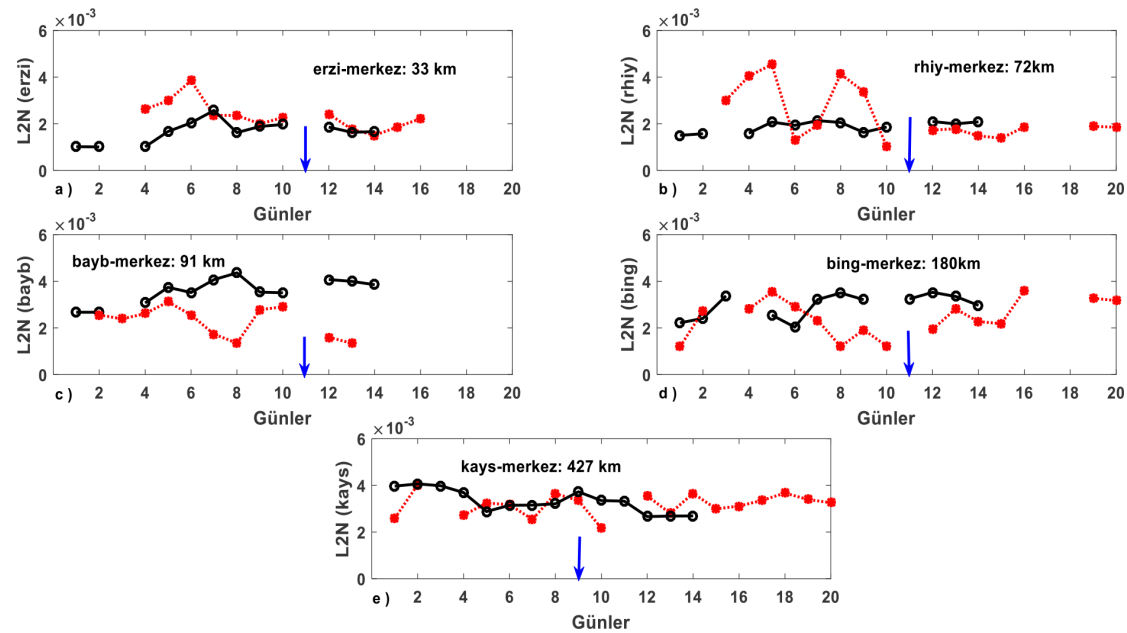
Şekil 9. Ardışık E1 günleri ve ardışık sakin günler arasındaki ÇİK değerleri: a) erzi, b) rhiy, c) bayb, d) bing, e) kays. Deprem periyodu " kırmızı nokta" ile, sakin günler periyodu "siyah daire" ile, depremin olduğu gün ise "mavi ok" ile gösterilmiştir.

Figure 9. CCC values between consecutive days of E1 earthquake and consecutive quiet days for a) erzi, b) rhiy, c) bayb, d) bing, e) kays. Earthquake days, quiet days periods and the earthquake day are demonstrated with "red dot", "black circle" and "blue arrow", respectively.



Şekil 10. Ardışık E1 günleri ve ardışık sakin günler arasındaki KLD değerleri: a) erzi, b) rhiy, c) bayb, d) bing, e) kays. Deprem periyodu " kırmızı nokta" ile, sakin günler periyodu "siyah daire" ile, depremin olduğu gün ise "mavi ok" ile gösterilmiştir.

Figure 10. KLD values between consecutive days of E1 earthquake and consecutive quiet days for a) erzi, b) rhiy, c) bayb, d) bing, e) kays.. Earthquake days, quiet days periods and the earthquake day are demonstrated with "red dot", "black circle" and "blue arrow", respectively.



Şekil 11. Ardışık E1 günleri ve ardışık sakin günler arasındaki L2N değerleri: a) erzi, b) rhiy, c) bayb, d) bing, e) kays. . Deprem periyodu " kırmızı nokta" ile, sakin günler periyodu "siyah daire" ile, depremin olduğu gün ise "mavi ok" ile gösterilmiştir.

Figure 11. L2N values between consecutive days of E1 earthquake and consecutive quiet days for a) erzi, b) rhiy, c) bayb, d) bing, e) kays. Earthquake days, quiet days periods and the earthquake day are demonstrated with "red dot", "black circle" and "blue arrow", respectively.

ışığında bu üç yöntemin, deprem alarm sinyalini oluşturabilmek adına geliştirilmeye ihtiyacı olduğu sonucuna varılmıştır. Orta enlemlerde meydana gelen ve büyüklüğü 6'dan fazla olan depremleri incelemek; bu yöntemlerin geliştirilmesine ve Türkiye üzerinde, iyonküre parametreleri kullanılarak bir deprem alarm sinyali geliştirilmesine katkı sağlayacağı sonucu ortaya çıkmıştır.

KATKI BELİRTME

Bu çalışma TÜBİTAK EEEAG 105E171, 109E055, 114E541, 115E915 ile ortaklı TÜBİTAK EEAG 114E092 ve AS CR 14/001 numaralı projeler tarafından desteklenmiştir. Yazar, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü IONOLAB Araştırma Grubu'na ve Harita Genel Komutanlığı'na, ve hakem olarak makaleye destek veren Prof. Dr. Osman ÖZCAN ve bir diğer hakemimize katkılarından dolayı teşekkürlerini sunar.

KAYNAKLAR

Arikan, F., C. B. Erol and O. Arikan, 2003. Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data. Journal of Geophysical Research-Space Physics, 109(A12), 1469, doi:10.1029/2003JA009605.

Arikan, F., Karatay, S., Arikan, O., 2009. Investigation of ionospheric disturbance due to strong earthquakes using Total Electron Content. Proceeding of EGU (Europen Geosciences Union), Vienna, Austria, Abstracts, p. 8440.

Biqiang, Z., Weixing, W., Libo, L., Tian, M., 2007. Morphology in the Total Electron Content under geomagnetic disturbed conditions: results from global ionosphere maps. Annales Geophysicae, 25(7): 1555-1568.

Bondur, V., Smirnov, V., 2006. Seismo-ionospheric variations during the earthquake in Pakistan (September 2005) as a precursor of seismic events. IEEE of Advances in Space Technologies International Conference, p. 11-15, doi: 10.1109/ICAST.2006.313788.

Bratsolis, E., Sigelle, M., 2003. Kullback-Leibler Divergence and Markov Random Fields for speckled image restoration. Signal Processing and Its Applications, 1, 425-428.

Chiang, L. H., Braatz, R. D., 2003. Process monitoring using causal map and multivariate statics fault detection and identification. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 65, 159-178.

Chuo, Y.J., Chen, Y.I., Liu, J.Y., Pulinets, S.A., 2001. Ionospheric foF2 variations prior to strong earthquakes in Taiwan area. Advances in Space Research, 27(6), 1305-1310.

Cover, T.M., Thomas, A.J., 2006. Elements of Information Theory. Wiley Inter-Science, New York.

Hall, P., 1987. On Kullback-Leibler loss and estimation. The Annals of Statistics, 15(4), 1491-1519.

Inglada, J., 2003. Change detection on SAR images by using a parametric estimation of the Kullback-Leibler Divergence. IGARSS, 6(21-25), 4104-4106.

IONOLAB, www.ionolab.org

Kandilli Rasathanesi, www.koeri.boun.edu.tr.

Karatay, S.. Arikan, F. and Arikan, O., 2010. Investigation of TEC Variability due to Seismic and Geomagnetic Disturbances in the Ionosphere. Radio Science. 45, 1-12, doi:10.1029/2009RS004313. 1-12.

Karatay, S., Cinar, A., Arikan, F., 2017. Ionospheric responses during equinox and solstice periods over Turkey. Advances in Space Research, 60(9), 1958-1967.

Kouris, S.S., Fotiadis, D.N., 2002. Ionospheric variability: a comparative statistical study. Advances in Space Research, 29(6), 977-985.

Kouris, S.S., Polimeris, K.V., Cander, L.R., 2006. Specifications of TEC variability. Advances in Space Research, 37(5), 983-1004.

Kreyszig, E., 1988. Advanced Engineering Mathematics. John Wiley & Sons Inc., New York.

Lazo, B., Alazo, K., Rodriguez, M., Calzadilla, A., 2004. TEC variability over Havana for different solar activity conditions. Advances in Space Research, 34(9), 2044-2048.

Liu, J.Y., Chen, Y.I., Pulinets, S.A., Tsai, Y.B., Chuo, Y.J., 2000. Seismo-ionospheric signatures prior to M≥ 6.0 Taiwan earthquakes. Geophysical Research Letters, 27(19), 3113-3116.

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. Annales Geophysicae, 22(5), 1585-1593.

Nayir, H., 2007. Yerküresel Konumlama Sistemi işaretleri kullanarak iyonküre Toplam Elektron İçeriği Kestirimi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (Türkçe).

Nayir, H., Arikan, F., Arikan, O., Erol, C.B., 2007. Total Electron Content estimation with Reg-Est. Journal of Geophysical Research-Space Physics, 112, A11313.

NOAA, http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices

Plotkin, V.V., 2003. GPS detection of ionospheric perturbations before the 13 February 2001 El Salvador earthquake. Natural Hazards and Earth Systems Sciences, 3, 249-253.

Pulinets, S.A., 2004. Ionospheric precursors of earthquakes; recent advances in theory and practical applications. TAO, 15(3), 413-435.

Pulinets, S.A., Gaivoronska, T.B., Contreras L.A., Ciraolo, I., 2004. Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquake. Natural Hazards and Earth Systems Sciences, 4, 697-702.

Pulinets, S.A., Contreas, A.L., Bisiacchi-Giraldi, G., Ciraolo, L., 2005. Total Electron Content variations in the ionosphere before the Collima, Mexico earthquake of 21 January 2003. Geofisicia Internacional, 44(4), 369-377.

Pulinets, S.A., Kotsarenko, A.N., Ciraolo, L., Pulinets, I.A., 2006. Special case of ionospheric day-to-day variability associated with earthquake preparation. Advances in Space Research, 39(2007), 970-977.

Rached, Z., Alajaji, F., Campbell, L.L., 2004. The Kullback-Leibler Divergence rate between Markov sources. IEEE Transactions of Information Theory, 50, 917-923.

Rishbeth, H. and Garriot, O.K., 1969. Introduction to Ionospheric Physics. Academic Press, New York.

Smirnova E.V., Smirnov, V.M., 2005. Modification of electron density profile about the earthquake epicenter by GPS data. Proceeding of 2nd RAST (Recent Advances in Space Technologies), İstanbul, Turkey, p. 767-771, doi: 10.1109/RAST.2005.1512669.

Smirnova, E.V., Smirnov, V.M., 2007. Monitoring the earth ionosphere during the earthquake by radio translucence method by GPS data. Proceeding of 3rd RAST (Recent Advances in Space Technologies), İstanbul, Turkey, p. 666-671, doi: 10.1109/RAST.2007.4284076.

Space Research Centre, Polish Academy of Sciences, http://www.cbk.waw.pl/rwc/idce.html.

Trigunait, A., Parrot, M., Pulinets, S.A., Li, F., 2004. Variations of the ionospheric electron density during the Bhuj seismic event. Annales Geophysicae, 22 (12), 4123-4131.

USGS, http://earthquake.usgs.gov/regional/world.

Vlasov, M., Kelley, M.C., Kil, H., 2003. Analysis of ground-based and satellite observations of F-region behavior during the great magnetic storm of July 15, 2000. Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics, 65, 1223-1234.

Weisberg, S., 2005. Applied Linear Regression. John Wiley & Sons. Inc., New York.

World Data Center for Geomagnetism, Kyoto, http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/.

Zhang, D., Xiao, Z., 2000. Study of ionospheric TEC using GPS during the large solar flare burst on November 6, 1997. Chinese Science Bulletin, 45(19), 1749-1752.

Zhang, M. L., Shi, J. K., Wang, X., Radicella, S. M., 2004. Ionospheric variability at low latitude station: Hainan, China. Advances in Space Research, 34(9), 1860-1868.