

Toplam Elektron İçeriği ile Litosfer-İyonosfer Bağlaşımının İncelenmesi

Investigation of Litosphere-Ionosphere Coupling Using Total Electron Content

Seçil KARATAY¹, Feza ARIKAN², Orhan ARIKAN³

1. Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

Fırat Üniversitesi
karatays@gmail.com

2. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Hacettepe Üniversitesi
arikan@hacettepe.edu.tr

3. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Bilkent Üniversitesi
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada Yerküresel Konumlama Sisteminin (YKS) elde edilen Toplam Elektron İçeriği (TEİ) kestirimleri ile depremler arasındaki ilişki incelenmiştir. Deprem gününün de içinde olduğu 30 günlük zaman aralığında İyonosferin sakin olduğu günlerde, 2003-2008 yılları arasında Japonya'da meydana gelen farklı özellikteki beş deprem ve Mayıs 2008'de Çin'de meydana gelen deprem, çalışma kapsamında ele alınmıştır. Çalışmanın istatistiksel analizi için daha önce literatürde önerilen çapraz ilinti katsayı (İK) yöntemi ve yeni olarak Kullback-Leibler İraksaklığı (KLI) ile L2-Mesafesi (L2M) yöntemleri kullanılmıştır. TEİ üzerinde İK, KLI ve L2M yöntemleri ile istasyonlar ve günler arasında İyonosferin sakin ve bozulmalı durumları da göz önüne alınarak incelemeler yapılmıştır. Deprem zaman aralıklarında gözlenen etkiler ile sakin ve bozulmalı zaman aralıklarında gözlenen etkiler karşılaştırılmıştır. İK analizi yöntemiyle incelemelerde sismik hareketliliğin olduğu zamanlarda gözlenen anormalliklerin, sakin günler için seçilen zamanlarda da bulunabildiği ortaya çıkmıştır. Şiddeti 6.0'dan büyük olan depremlerle bir deprem alarm sinyali oluşturabilmek için sismik hareketliliğin yoğun olduğu ve bu anlamda tehlike arz eden bölgelerde birbirine çok yakın YKS istasyonlarından elde edilecek TEİ ile uzay-zaman kestirimlerinin karşılaştırılmasının gelecek çalışmada ele alınmasının önemi ortaya konmuştur.

Abstract

In this study, the relation between Total Electron Content (TEC) estimates obtained from GPS and the earthquakes is examined. Five earthquakes between 2003-2008 occurred in Japan with different properties and China earthquake in May 2008 are chosen for the purpose. The 15-days period before and after the registered earthquakes are considered for the basis of this investigation. Also the TEC is computed for each GPS station for the time periods including Ionosphere quiet and disturbed days not without any serious earthquake in the region. For the statistical analysis, the cross correlation function (CC) which is used in the literature before, and the Kullback-Leibler Divergence (KLD) with L2-Norm (L2N) methods which are used for the first time in this context, are applied to the data sets. The computed values for CC, KLD and L2N are compared for both between different GPS stations where available and between consecutive days for the

time periods in the data set. With CC analysis, the anomalies existed in the earthquake time intervals are also observed for the quiet days data set. For the earthquakes with scale larger than 6, the possibilities of generating an alarm signal is more likely with a future detailed comparative study of the estimated TEC nearby GPS station estimates in space and time.

1. Giriş

İyonosfer katmanının en önemli parametresi zaman, konum, güneşin hareketliliği ve jeomanyetik alana bağlı olarak değişim gösteren elektron yoğunluğudur. Elektron yoğunluğuna bağlı olan ve İyonosferin karakteristik yapısını ifade eden diğer bir parametre ise Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. Toplam Elektron İçeriği, 1 m² kesitli bir silindir boyunca toplam serbest elektron miktarıdır. Birimi TECU olup 1 TECU, 10¹⁶ elektron /m²'dir. TEİ kestirimi için yer tabanlı ve uydur tabanlı çeşitli teknikler bulunmaktadır. Bunlardan içinde en kullanışlı olanı Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) dir [1].

Son yıllarda yer kabuğundaki sismik hareketliliğin çeşitli modeller altında İyonosfere bağlaştığı ve iyon-elektron yoğunluğunu değiştirdiğine dair yoğun gözlemler yapılmıştır [2-5]. Bu etkileşimleri ve değişimleri incelemek için istatistiksel, fiziksel teoriler; elektron yoğunluğu, Toplam Elektron İçeriği (TEİ) gibi parametrelerinin kullanıldığı farklı modeller ortaya konmuştur. Litosferde başlayan anormal bir işleyişin, İyonosferde elektron yoğunluğunda ve buna bağlı bir parametre olan TEİ değerlerinde de büyükölçekli düzensizlikler yarattığı ileri sürülmektedir.

Literatürde İyonosferin deprem öncesi hareketliliğini inceleyen modeller İlinti Analizi [3,4], Çeyrekler Arası Alan (IQR-Inter Quartile Range) Analiz [6,7], TEİ Farkı Analizi [8], İyonosferik Düzeltme [8,9] başlıkları altında toplanabilir. Bunlardan öne çıkan ve deprem öncesi kestirimine olanak sağlamada daha başarılı bir yöntem olan ilinti analizidir [3,4]. İlinti analizi için, sakin ve jeomanyetik açıdan karışık günlerde İyonosonda ile ölçülen kritik frekans ve YKS ağlarıyla ölçülen Toplam Elektron İçeriğinin (TEİ) değişkenliği çalışılmıştır. Bu çalışma için iki ölçüm noktası kullanılmıştır: Birincisi, depremin etki alanı içindeki "alıcı-sensör"; ikincisi, bu bölge dışında kalan "kontrol-alıcı"dır [3,4]. Bu çalışmalarda Rusya aktif sismik bölgesi içinde Batı Pasifik alanında; Rusya'nın uzak doğusu, Tayvan ve Japonya'daki bir dizi deprem incelenmiştir. Bu yöntemle, Dik Toplam Elektron İçeriği (VTEC-Vertical Total Electron

Content) değerleriyle çapraz-ilinti katsayıları hesaplanmıştır. Ocak 2003 Collima depreminde çapraz-ilinti katsayısının, deprem tarihinden beş gün önce 0.7'ye, sekiz gün önce 0.9'un altına kadar düştüğü gözlenmiştir. Aynı işlemler Aralık 2003 San Simeon depreminde de test edilmiştir. Bu incelemelerde de deprem gününden 2, 4 ve 4, 8 gün önceki günlerde sırasıyla 0.5, 0.65 ve 0.6, 0.65 değerlerine düştüğü kaydedilmiştir. Bu keskin düşüşlerin, deprem habercisi bir anormallik olduğu ileri sürülmüştür [3,4,10].

İki sayısal dağılım arasında benzerlik ve farklılıkları belirlemekte sık sık kullanılan yöntemler arasında Kullback-Leibler Iraksaklığı (KLI) [11,12] ve L2-Mesafesi (L2M) [13] sayılabilir. KLI ve L2M analizleri, TEİ verileri üzerinde deprem etkisi ile bozulmayı araştırmak için daha önce hiç kullanılmamıştır.

Bu çalışmada İK, KLI, L2M yöntemleri, sismik hareketlilik ile İyonosferde iyon ve elektron dağılımları arasındaki olası ilişkiyi araştırmak amacıyla, TEİ verileri üzerinde kullanılmıştır. Çalışma için 2003–2008 yılları arasında Japonyada meydana gelen ve büyüklüğü 5.9'dan başlayan beş deprem ile 12 Mayıs 2008 tarihinde Çin'in Şiyan bölgesinde meydana gelen 7.9 büyüklüğünde olan deprem seçilmiştir. Kullanılan yöntemler Bölüm 2'de, inceleme sonuçları Bölüm 3'te sunulmuştur.

2. Yöntem

Dik Toplam Elektron İçeriği (VTEC), dünya üzerindeki bir YKS alıcısına göre yerel zenit doğrultusunda hesaplanan toplam serbest elektron miktarıdır. d. gün için hesaplanan VTEC verileri $\mathbf{x}_{u;d}$ vektörüyle ifade edilebilir:

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

Burada u, alıcı numarasını; N, toplam ölçüm sayısını; n, örnek numarasını ($1 \leq n \leq N$); T ise matris devriğini göstermektedir.

Seçilen birinci istasyona ait günlük VTEC verileri $\mathbf{x}_u$ vektörüyle, ikinci istasyona ait günlük VTEC verileri $\mathbf{x}_v$ vektörüyle tanımlanırsa, N_i başlangıç N_s bitiş örnek numarası ve N_T toplam örnek sayısı olmak üzere bu iki istasyonun d. gününe ait günlük çapraz ilinti fonksiyonu $\mathbf{r}_{u,v;d}$, aşağıdaki denklemle ifade edilebilir [3,4]:

$$\mathbf{r}_{u,v;d} = \frac{1}{N_T \sigma_{u;d} \sigma_{v;d}} \sum_{n=N_i}^{N_s} (x_{u;d}(n) - \bar{x}_{u;d})(x_{v;d}(n) - \bar{x}_{v;d}) \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitlikte $\bar{x}_{u;d}$ ve $\bar{x}_{v;d}$ sırasıyla d. gün için N_T örnek üzerinden $\mathbf{x}_{u;d}$ ve $\mathbf{x}_{v;d}$ vektörlerinin ortalama değerini $\sigma_{u;d}$ ve $\sigma_{v;d}$ ise bu vektörlerin standart sapmasını vermektedir. Bu çalışmada Tablo 1'de verilen tüm istasyonlar için deprem öncesi ve deprem sonrası 15 gün aralığındaki tüm ardışık günler için $\mathbf{r}_{u,d,d+1}$ ile tanımlanan öz-ilinti katsayıları da hesaplanmıştır.

TEİ veri setleri üzerine olasılık ve bilgi teorisinde kullanılan, farklı bir istatistiksel analiz yöntemi olan KLI analizi uygulanmıştır. Bu yöntem için veri setindeki değerler, mevsimsel ve yıllık farkları ortadan kaldırmak için önce düzgelendirilmiştir. İki istasyonun d. günündeki $\mathbf{x}_{u;d}$ ve $\mathbf{x}_{v;d}$ vektörlerinin günlük deneysel Olasılık Yoğunluk Fonksiyonları (OYF) $\hat{\mathbf{P}}_{u;d}$:

$$\hat{\mathbf{P}}_{u;d} = \mathbf{x}_{u;d} \left(\sum_{n=N_i}^{N_s} x_{u;d}(n) \right)^{-1} \quad (3)$$

şeklinde yaklaşılmıştır. u ve v istasyonları arasında Eşitlik 3'te verilen yaklaşımlar yardımıyla elde edilen ve Eşitlik 4 ile ifade edilen simetrik Kullback-Leibler Iraksaklığı ifadesi kullanılmıştır [11,12,14,15]:

$$KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) = K(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) + K(\hat{\mathbf{P}}_{v;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) \quad (4)$$

Burada $K(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d}), K(\hat{\mathbf{P}}_{v;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d})$ fonksiyonları:

$$K(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) = \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n) \ln \left(\frac{\hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n)}{\hat{\mathbf{P}}_{v;d}(n)} \right) \quad (5)$$

$$K(\hat{\mathbf{P}}_{v;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) = \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{\mathbf{P}}_{v;d}(n) \ln \left(\frac{\hat{\mathbf{P}}_{v;d}(n)}{\hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n)} \right)$$

eşitlikleriyle ifade edilmiştir. Bir istasyonun birbirini izleyen d. ve d+1. günleri arasındaki simetrik KLI hesaplamaları için

$$KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1}) = K(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1}) + K(\hat{\mathbf{P}}_{u;d+1} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) \quad (6)$$

eşitliği kullanılmıştır. u istasyonunun sakın günler zaman aralığındaki toplam N_d kadar gününden elde edilen ortalama vektörü Eşitlik 7'deki gibi tanımlanmıştır.

$$\bar{\mathbf{x}}_{u; d_i - d_s}(n) = \frac{1}{N_d} \sum_{n_d = d_i}^{d_s} x_{u; n_d}(n) \quad (7)$$

Burada İyonosferin sakın gün zaman aralığında d_i başlangıç gününü, d_s bitiş gününü temsil etmektedir. Eşitlik 7 ile tanımlanan sakın günlerin ortalama vektörü ile bir istasyonun deprem ve bozulmalı günleri arasındaki Eşitlik 8 ile ifade edilen KLI değerleri hesaplanmıştır:

$$KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i - d_s}) = K(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i - d_s}) + K(\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i - d_s} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) \quad (8)$$

Tablo 1'de yer alan depremler için Eşitlik 3'ten yararlanılarak elde edilen düzgelendirilmiş değerler ile Eşitlik 9 ile ifade edilen L2M değerleri hesaplanmıştır. L2M, Olasılık Yoğunluk Fonksiyon vektörleri arasındaki farkın bir ölçütüdür [13]:

$$L2M(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) = \sqrt{\sum_{n=N_i}^{N_s} (\hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n) - \hat{\mathbf{P}}_{v;d}(n))^2} \quad (9)$$

Bir istasyonun ardışık günlerindeki $\hat{\mathbf{P}}_{u;d}$, $\hat{\mathbf{P}}_{u;d+1}$ fonksiyonları için $L2M(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1})$ ve sakın günlerinin ortalama vektörü $\hat{\mathbf{P}}_{u;d_i - d_s}$ için $L2M(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d_i - d_s})$ hesaplanmıştır. Bu bölümde önerilen istatistiksel yöntemlere ait uygulamalar Bölüm 3'te sunulmuştur.

3. Sonuçlar

Bölüm 2'de verilen eşitliklerle tanımlanan İK, KLI ve L2M yöntemleri, 2003-2008 yılları arasında Japonya'da meydana gelen beş depreme ve Mayıs 2008 Çin depremine uygulanmıştır. Seçilen depremler Tablo 1'de tarih, zaman (Greenwich Saati-GS), coğrafik konum (enlem, boylam-derece), Richter ölçeğine göre büyüklük (M), yer yüzeyine derinlik (z-km) ve deprem merkezine en yakın seçilen YKS istasyonu verilmiştir [16]. Tabloda E1, E2, E3, E4, E5, E6 olarak kodlanan deprem merkezleri sırasıyla Hokkaido, Honşu, Honşu, Kiyuşiyu, Honşu, Şiyan bölgelerini temsil etmektedir.

Tablo 1: Depremlerin konum, zaman, büyüklük ve derinlik ve seçilen merkez istasyon göstergesi

yer	tarih	GS	°K	°D	M	z	Merkez İstasyon
E1	25.09 2003	1950	41	143	8.3	27	mizu
E2	05.09 2004	1457	33	137	7.4	10	kgni
E3	13.06 2008	2343	39	140	6.9	10	mizu
E4	11.06 2006	2001	33	131	6.3	154	usud
E5	23.07 2005	0734	35	139	5.9	65.6	mtka
E6	12.05 2008	0628	30	103	7.9	19	kunm

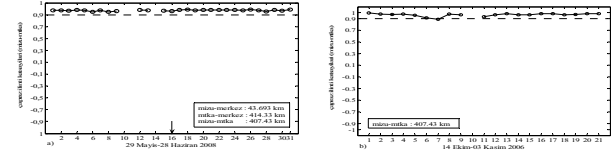
Tablo 2’de çalışmada kullanılan YKS istasyonlarının konum ve kodları verilmiştir. Bu istasyonlara ait YKS (RINEX) uydu yörünge ve uydu yanlılığı verileri IGS merkezlerinin (IGS), IONEX formatında alınmıştır. Bu dosyalar D-TEİ yöntemi ile birleştirilmiş ve IONOLAB-TEC yüksek zaman çözünürlüklü gürbüz TEİ değerleri elde edilmiştir. IONOLAB-TEC kestirim yöntemi ile ilgili ayrıntılı bilgi [17,18] ve www.ionolab.org’dan bulunabilir. Çalışma için seçilen İyonosferin sakin zaman aralığında ve deprem günlerinde İyonosferik fırtına yoktur [19]. Tablo 1’de verilen E1-E5 depremlerini karşılaştırmak için İyonosferin sakin günleri 14 Ekim-03 Kasım 2006 aralığında, bozulmalı günleri ise 14 Ekim-09 Kasım 2003 aralığında seçilmiştir.

Tablo 2: Çalışma kapsamında kullanılan verilerin ait olduğu istasyonlar ve koordinatları

YKS İstasyonu	Alıcı Kodu	Enlem	Boylam
Koganei, Japonya	kgni	35.5 °K	139.4° D
Kashima, Japonya	ksmv	35.7 °K	140.6° D
Mizusawa, Japonya	mizu	38.9 °K	141.1° D
Mitaka, Japonya	mtka	35.4 °K	139.5° D
Tsukuba, Japonya	tskb	35.9 °K	140.0° D
Usuda, Japonya	usud	35.9 °K	138.3° D
Yuzh.-Sakh, Rusya	yssk	46.8 °K	142.7° D
Kunming, Çin	kunm	24.8 °K	102.8° D

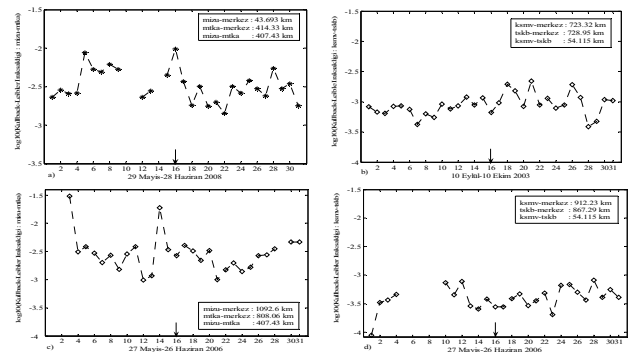
E1-E5 depremleri için Tablo 2’de yer alan ilk yedi istasyona ait veriler kullanılarak Eşitlik 2 yardımıyla depremler için 1736, sakin ve bozulmalı günler için ise toplam 435 İK hesaplanmıştır. Bu incelemelerde ele alınan depremler için şiddeti 6’dan küçük olan depremlerde birbirine uzaklığı 119-208 km olan istasyonların çaprazlamasında 0.6 değerinde dört katsayı hesaplanmıştır. Deprem öncesi günleri için istasyonlar arası İK değerinin deprem şiddeti ile doğru orantılı olarak daha fazla gün için 0.9 değerinin altına düştüğü gözlenmiştir. Merkez istasyonun, deprem merkezine uzaklığına göre 30-70 km ve 70-300 km mesafelerinde istasyonlar arası katsayı değerlerinde 0.9’un altına düşen değer gözlenmemiştir. Merkez istasyonun deprem merkezine yakınlığı 300 km’den, diğer YKS istasyonlarına uzaklığı ise 30 km’den az iken İK 0.9 değerinin altına bir kez düşmüştür. Deprem merkezine yakınlığı 300 ile 800 km arasındayken İK değerlerinin yaklaşık %2 oranında 0.9’un altına düştüğü gözlenmiştir. Deprem merkezine 100-300 km alanda bulunan istasyonlar arasında ilinti yüksek, 300 km mesafeden büyük yerlerde ise

ilinti daha az çıkmıştır. Birbirine en fazla 20 km mesafede bulunan istasyonlar arasında deprem günleri, sakin ve bozulmalı günler aralığında toplam 2171 İK değerinden sadece bir tanesinin 0.9’un altında kaldığı gözlenmiştir. Mesafe 20-70 km arasında olduğunda 0.9’dan küçük deprem günlerinde dört, sakin günlerde bir, bozulmalı günlerde ise bir değer gözlenmiştir. İstasyonlar arası uzaklık 70 km’nin üstüne çıktıkça deprem günlerinde, sakin ve bozulmalı günlerde 0.9’un altında kalan katsayı artmıştır. Birbirine en fazla 20 km mesafede bulunan istasyonlarda deprem dönemleri de dahil ilinti yüksek çıkmıştır. Örnek olarak Şekil 1-a’da E3 depreminde mizu-mtka istasyonları arası İK değerleri, Şekil 1-b’de bu istasyonların sakin günlerindeki İK değerleri verilmiştir. Deprem merkezine 43.6 km mesafede olan mizu istasyonu ve bu istasyona 407.4 km bulunan mtka istasyonu arasında deprem günlerinde İK değerlerinin 0.9 ile 1 arasında değiştiği, aynı istasyonların sakin günlerdeki İK değerlerinde 7. günde katsayının 0.8’e kadar düştüğü görülmektedir. Şekilde boş olarak gözüken günlerde mizu ve mtka YKS istasyonlarından veri kaydedilmemiştir. Depremin olduğu gün ok ile belirtilmiştir.



Şekil 1. a) E3 depremi için mizu-mtka ve b) sakin günler için mizu-mtka istasyonları arası çapraz ilinti katsayıları

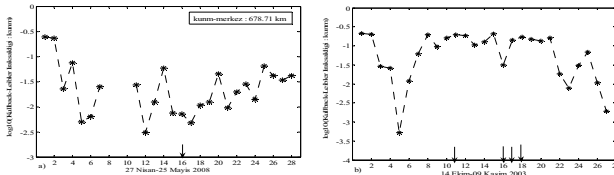
E1-E5 depremleri için Tablo 2’de verilen ilk yedi istasyonla Eşitlik 4 ve Eşitlik 9 kullanılarak çaprazlama 2604 KLI değeri ve 2604 L2M değeri hesaplanmıştır. Birbirine en fazla 70 km uzaklık olan istasyonlar arasında KLI değerlerinde sakin ve deprem günleri için fark gözlenmemiştir. Aralarındaki uzaklık 70 km’den fazla olduğunda ve depremin ölçeği küçüldükçe sakin, bozulmalı günler ve deprem günleri arasındaki fark azalmıştır. L2M analizlerinde de KLI sonuçlarına paralel sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 2-a’da birbirine 407 km mesafe bulunan mizu-mtka istasyonlarına ait E1 depremi için ve Şekil 2-c’de E4 depremi için KLI değerleri verilmiştir. Aynı deprem için birbirine daha yakın olan 54 km mesafedeki ksmv-tskb istasyonları arası değerler Şekil 2-b’de E1 depremi için Şekil 2-d’de E4 depremi için gösterilmiştir. İstasyonlar arası mesafe azaldıkça ve deprem şiddeti arttıkça değerlerin sakin günler için oluşan eşik değerine yaklaştığı gözlenmiştir.



Şekil 2. E3 depremi için a) mizu-mtka b) ksmv-tskb ve E4 depremi için c) mizu-mtka d) ksmv-tskb istasyonları arası log10 KLI değerleri

$r_{u;d,d+1}$, $L2M(\hat{P}_{u;d} \setminus \hat{P}_{u;d+1})$ fonksiyonları ve Eşitlik 6 ile elde edilen E1-E6 depremleri için bir istasyonun deprem günlerinde deprem öncesi, deprem sonrası, sakin ve bozulmalı günlerde KLI ve L2M değerlerinin ardışık günler için ani değişiklik göstermediği gözlenmiştir. Ardışık sakin ve bozulmalı günlerde İK değerleri 0.8 ile 1 arasında olmasına karşın deprem günlerinde ilintiler depremden 2 gün önce -0.8 3 gün önce -0.7, 1 gün önce 0.3 değerlerine kadar düşmüştür.

Eşitlik 8 ve $L2M(\hat{P}_{u;d} \setminus \hat{P}_{u;d+1-d_s})$ ile ifade edilen eşitlik E1-E6 depremlerine ve bozulmalı günlere uygulanmıştır. Sakin gün aralığında ortalama sakin gün elde edilmiş ve düzgellenmiştir. Ortalama Değer Sakin Gün (ODSG), E1-E6 depremleri tüm istasyonları deprem öncesi ve deprem sonrası 15 günlük zaman aralıkları için ve tüm YKS istasyonlarında hesaplanan 28 günlük bozulmalı gün aralıkları için incelenmiştir. ODSG-deprem eşleşmesi için KLI ve L2M farkı az, ODSG-bozulmalı eşleşmesi için ise daha büyük çıkmıştır. Bozulmalı günlerde farkın büyük olmasına karşın İK değerleri 0.8 ile 1 arasında değişmiştir. E6 depremi için deprem merkezine 678 km uzaklıkta bulunan istasyonun bozulmalı günlerine ait değerlerinin deprem günlerinden daha fazla olduğu Şekil 3'te görülmektedir.



Şekil 3.a) E6 depremi için kum ve b) bozulmalı günler için kum istasyonu log10 KLI değerleri

4. Tartışma

Bu çalışmada Yerküresel Konumlama Sisteminden (YKS) elde edilen Toplam Elektron İçeriği (TEİ) kestirimleri ile depremler arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu çalışma için daha önce kullanılan İK analizi ve yeni olarak KLI ile L2M analizleri uygulanmıştır. Yedi YKS istasyonu üzerinde sakin, bozulmalı ve deprem günlerinde ilk olarak çaprazlama yapılarak uzay boyutunda İK, KLI ve L2M hergün için hesaplanmıştır. İK analizi yöntemiyle seçilen depremlerde deprem öncesi belirti niteliği taşıyan ve aynı depremin aynı istasyonlarında kendini tekrar eden etkiler gözlenmemiştir. Buna karşın depremin ölçeği büyüdükçe sakin, bozulmalı günler ve deprem günleri arasındaki fark artmıştır. Bu nedenle İK yöntemiyle istasyonlar arası çaprazlama yapılarak deprem öncesi belirtiler elde etmek ve deprem kestirimi yapmak, aynı belirtilerin sakin günlerde de ortaya çıkmasından ötürü çok zordur. İkinci olarak tek bir istasyonun birbirini izleyen günleri arasında üç yöntem üç zaman aralığı için incelenmiştir. Bu şekilde deprem öncesi, deprem sonrası, sakin ve bozulmalı günlerde KLI ve L2M değerlerinin ardışık günler için ani değişiklik göstermediği gözlenmiştir. İK değerlerinde deprem günlerinde sakin ve bozulmalı günlere göre ilinti çok zayıf çıkmıştır. Son olarak üç yöntem düzgellenmiş ODSG-deprem ve ODSG-bozulmalı eşleşmelerine uygulanmıştır. Deprem eşleşmesi için KLI ve L2M farkı küçük, bozulmalı eşleşmesi için ise daha büyük gözlenmiştir. Bozulmalı günlerde farkın büyük olmasına karşın İK değerlerinde yüksek ilinti katsayısı bulunmuştur. Bu çalışmada, verilerin ışığında İK, KLI ve L2M yöntemlerinin

tek başlarına bir deprem alarm sinyali oluşturulmasına yetmeyeceği ve gelecek çalışmaların birbirine yakın konumlanmış YKS istasyonlarının uzay-zaman TEİ kestirimleri üzerinden yapılması gerektiği ortaya konmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK EEEAG 105E171 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

5. Kaynakça

- [1] Nayir, H., *Yerküresel Konumlama Sistemi işaretleri kullanarak İyonküre toplam elektron içeriği kestirimi*, Yüksek Lisans Tezi, H.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2007.
- [2] Ondoh, T., "Seismo-Ionospheric Phenomena", *Advances in Space Research*, 26(8): 1267-1272, 2000.
- [3] Pulinets, S.A., "Ionospheric precursors of earthquakes; recent advances in theory and practical applications", *TAO*, 15(3):413-435, 2004.
- [4] Pulinets, S.A., Gaivoronska, T.B., Contreras L.A. and Ciraolo, I., "Correlation analysis technique revealing ionospheric precursors of earthquake", *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 4:697-702, 2004.
- [5] Liu J.Y., Chen, Y.I., Pulinets S.A., Tsai Y.B. and Chuo Y.J., "Seismo-ionospheric signatures prior to M $\geq$ 6.0 Taiwan earthquakes", *Geophysical Research Letters*, 27(19): 3113-3116, 2000.
- [6] Liu, J.Y., Chuo Y.J., Shan, S.J., Tsai, Y.B., Chen, Y.I., Pulinets, S.A. and Yu, S.B., "Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements", *Annales Geophysicae*, 22(5): 1585-1593, 2004.
- [7] Chuo, Y.J., Chen, Y.I., Liu, J.Y. and Pulinets, S.A., "Ionospheric f_0F_2 variations prior to strong earthquakes in Taiwan area", *Advances in Space Research*, 27(6):1305-1310, 2001.
- [8] Plotkin, V.V., "GPS detection of ionospheric perturbations before the 13 February 2001 El Salvador earthquake", *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 3: 249-253, 2003.
- [9] Trigunait, A., Parrot, M., Pulinets, S.A. and Li, F., "Variations of the ionospheric electron density during the Bhuj seismic event", *Annales Geophysicae*, 22(12): 4123-4131, 2004.
- [10] Biquang, Z., Weixing, W., Libo, L. and Tian, M., "Morphology in the total electron content under geomagnetic disturbed conditions: results from global ionosphere maps", *Annales Geophysicae*, 25(7): 1555-1568, 2007.
- [11] Fante, R.L., *Signal Analysis and Estimation*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1988.
- [12] Papoulis, A., *Signal Analysis*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1977.
- [13] Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1988.
- [14] Inglada, J., "Change detection on SAR images by using a parametric estimation of the Kullback-Leibler Divergence", *IGARSS*, 6(21-25): 4104-4106, 2003.
- [15] Cho, C., Kim, S., Lee, J. And Lee, DW, "A tandem clustering process for multimodal datasets", *European Journal of Operational Research*, 168(3): 998-1008, 2006.
- [16] <http://earthquake.usgs.gov/regional/world>
- [17] Arıkan, F., Erol, C.B., Arıkan O., "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 108(A12): 1469-1480, 2003.
- [18] Nayir, H., Arıkan, F., Arıkan, O. and Erol, C.B., "Total Electron Content Estimation with Reg-Est", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 112: A11313, 2007.
- [19] http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices