

Litosfer-İyonosfer Bağlaşımının TUSAGA Aktif TEİ Kestirimleri İle İncelenmesi

A Study of Lithosphere-Ionosphere Coupling Using TUSAGA Active TEC Estimates

Seçil KARATAY¹, Feza ARIKAN², Orhan ARIKAN³, Işiltan SAYIN² Melih Ş. AYSEZEN⁴ Dr. Müh. Onur LENK⁴, Doç. Müh. Bahadır AKTUĞ⁴

1. Fizik Bölümü
Fırat Üniversitesi
skaratay@firat.edu.tr

2. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi
arikan@hacettepe.edu.tr, isiltan@ee.hacettepe.edu.tr

3. Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

4. Harita Genel Komutanlığı
{melih.sukru.aysezen,onur.lenk,bahadir.aktug}@hgk.mil.tr

Özetçe

Bu çalışmada, Türkiye üzerindeki TUSAGA Aktif Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS) istasyon ağından elde edilen verilerle Toplam Elektron İçeriği (TEİ) kestirimleri kullanılarak sismik hareketliliğin iyonosferde meydana getirdiği bozulmalar incelenmiştir. Kuzey Anadolu Fay (KAF) hattında meydana gelmiş iki deprem çalışma kapsamında ele alınmıştır. Çalışmanın istatistiksel analizi için İlinti katsayı (İK) yöntemi, simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (KLD) ve L2-Normu (L2N) yöntemleri kullanılmıştır. TEİ üzerinde İK, KLD ve L2N yöntemleri ile istasyonlar ve günler arasında iyonosferin jeomanyetik ve sismik açıdan sakin durumları da göz önüne alınarak incelemeler yapılmıştır. Sakin günlerde İK değerleri yüksek ilinti sergilerken, deprem günlerinde İK değerleri 0.2'ye kadar düşmüştür. Deprem günlerinde elde edilen KLD değerlerinin sakin günlerde elde edilen değerlerden 10 kat büyük olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar ışığında, Türkiye üzerinde yer alan farklı fay hatlarında meydana gelmiş ve farklı sismik, jeolojik özelliklere sahip depremlerin incelenmesinin, gelecek çalışmada ele alınmasının önemi ortaya konmuştur.

Abstract

In this study, the disturbances in the ionosphere due to the seismic activity are investigated by using Total Electron Content estimates obtained from TUSAGA Active GPS stations in Turkey. Two earthquakes with same geophysical properties occurred on Northern Anatolia Fault are chosen for the study. TEC estimates are compared with each other using correlation coefficient (IK), symmetric Kullback-Leibler Distance (KLD) and L2-Norm (L2N) for geomagnetically and seismically quiet days of ionosphere and the earthquakes days. It is observed that IK values of quiet days are highly correlated in quiet days. IK values of earthquake days decrease down to 0.2 in earthquake days. KLD values of earthquake days are 10 times greater than those of the quiet days. In order to form a proper earthquake precursor alarm

signal, more earthquakes with different properties have to be investigated in the future.

1. Giriş

İyonosfer, atmosferin 60 ile 1000 km arasında yer alan önemli bir katmanıdır. İyonosfer katmanının en önemli parametresi konum, zaman, güneş, jeomanyetik ve sismik hareketlilikle değişim gösteren elektron yoğunluğudur. İyonosferi karakterize eden birçok parametre elektron yoğunluğuna bağlı fonksiyonlardır. Bunlardan biri de Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. TEİ, 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 uydu tabanlı çeşitli teknikler bulunmaktadır. Bunlardan içinde en kullanışlı olanı Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS)'dir [1-2].

Litosferde başlayan sismik hareketliliğin, iyonosferde ve atmosferdeki elektromanyetik ve kimyasal yapıda değişimler yarattığına dair son zamanlarda yoğun incelemeler yapılmıştır [3-10]. Literatürde yer alan bu çalışmalarda iyonosferin sismik hareketlilik dönemlerindeki değişkenliğini incelemek için elektron yoğunluğu, TEİ ve iyonosferin kritik frekansı gibi parametrelerin kullanıldığı istatistiksel ve fiziksel yaklaşımlar yapılmıştır. Bu çalışmalarda [3-10], sismik aktivitenin başlamasıyla deprem gününden birkaç gün öncesinden başlayarak iyonosferde TEİ değerlerinde de büyük ölçekli düzensizlikler meydana geldiği ileri sürülmüştür.

İstatistik ve enformasyon teorisinde Kullback-Leibler İraksaklığı, iki olasılık yoğunluk fonksiyonu arasındaki farklılıkları ölçmek için kullanılan bir yöntemdir [8-12]. Benzer olarak, L2-Normu, iki vektör arasındaki farkı tanımlamak için kullanılır [8-10,13]. Bu çalışmada İlinti analizi (İK) ile simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (KLD) ve L2-Normu (L2N) analizleri kullanılmıştır. Bu üç yöntem daha önce Japonya'da meydana gelmiş ölçeği 5'ten büyük beş

depremde ve 12 Mayıs 2008 Çin depreminde uygulanmıştır [8-10]. Ölçeği 5.9'dan daha küçük olan depremler bu çalışmalarda incelenmemiştir. Japonya üzerinde mevcut olan YKS istasyon sayısının sınırlı oluşundan ötürü, kullanılan istasyonların deprem merkezine olan uzaklığı 2000 km'ye kadar çıkabilmektedir. 12 Mayıs 2008 Çin depremi için veri sağlanabilen istasyon sayısı ise bir istasyonla sınırlı kaldığından dolayı, istasyonlar arası farklar incelenememiştir.

Bu çalışmada, Türkiye'de meydana gelmiş farklı ölçekli iki deprem seçilmiştir. Daha önceki çalışmalardan [10-12] farklı olarak ölçeği 5 ve 4.2 olan daha küçük ölçekli depremler incelenmiştir. TEİ verileri Harita Genel Komutanlığı tarafından Türkiye üzerine düzgün olarak yerleştirilmiş TUSAGA Aktif YKS istasyonlarından elde edilmiştir. Bu istasyonların birbirlerine olan uzaklığı 80 ile 100 km arasında değişmektedir. Bu nedenle Türkiye'nin farklı sismik bölgelerinde meydana gelebilecek bir depremi incelerken, deprem merkezi etrafına konumlanmış birden fazla istasyon ile çalışabilmek mümkün olacaktır. Bu çalışmada, daha önceki çalışmalardan [8-10] farklı olarak, seçilen YKS istasyonları deprem merkezine ve birbirlerine çok yakın mesafede yer almaktadır. TEİ verileri, her bir YKS istasyonu için deprem gününden 10 gün öncesi ve sonrası zamanlarda hesaplanmıştır. Her bir istasyonun TEİ verileri, iyonosferin jeomanyetik ve sismik aktivitenin olmadığı dönem için de elde edilmiştir. Üç yöntem, istasyonlar arası çaprazlama karşılaştırması, Ortalama Sakin Gün (OSG) karşılaştırması ve bir istasyonun ardışık günleri karşılaştırması olmak üzere üç farklı şekilde uygulanmıştır. Kullanılan yöntemler Bölüm 2'de, elde edilen sonuçlar ise Bölüm 3'te verilmiştir.

2. İstatistiksel Analiz Yöntemleri

Dünya üzerindeki bir YKS alıcısına göre yerel zenit doğrultusunda hesaplanan toplam serbest elektron miktarına Dik Toplam Elektron İçeriği (VTEC) denir. d. gün için hesaplanan VTEC verileri, u, alıcı numarası; N, toplam ölçüm sayısı; n, örnek numarası ($1 \leq n \leq N$); T ise matris devriği olmak üzere $\mathbf{x}_{u;d}$ vektörüyle ifade edilebilir:

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

TEİ veri setleri üzerinde mevsimsel ve yıllık farkları kaldırmak; farklı zaman aralıklarındaki değerleri karşılaştırabilmek için düzgelendirilmiştir. Eşitlik 1 ile ifade edilen bir u istasyonun d. gününün deneysel Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) $\hat{\mathbf{P}}_{u;d}$

$$\hat{\mathbf{P}}_{u;d} = \mathbf{x}_{u;d} \left[\sum_{n=N_i}^{N_s} x_{u;d}(n) \right]^{-1} \quad (2)$$

şeklinde yaklaştırılmıştır. Deprem dönemlerinde elde edilen TEİ değerlerinin, sismik açıdan hareketliliğin olmadığı dönemlerdeki TEİ değerlerinden ne kadar fark ettiğini gözlemleyebilmek için iyonosferik açıdan sakın günlerden elde edilmiş TEİ değerleriyle bir Ortalama Sakin Gün (OGS) vektörü hesaplanmıştır. u istasyonunun sakın günler zaman aralığındaki toplam N_d kadar gününden elde edilen ortalama vektörü Eşitlik 3'teki gibi tanımlanmıştır.

$$\mathbf{x}_{u;d_1-d_s} = \frac{1}{N_d} \sum_{n=d_s}^{d_s} \mathbf{x}_{u;n_d} \quad (3)$$

Burada İyonosferin sakın gün zaman aralığında d_i başlangıç gününü, d_s bitiş gününü temsil etmektedir. Eşitlik 3 ile

tanımlanan OGS vektörü için OYF, $\hat{\mathbf{P}}_{u;d_1-d_s}$ olarak hesaplanmıştır.

İki istasyonun VTEC verileri \mathbf{x}_u ve \mathbf{x}_v vektörleriyle 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

$$r(\mathbf{x}_{u;d}; \mathbf{x}_{v;d}) = \frac{1}{N_T \sigma_{u;d} \sigma_{v;d}} \sum_{n=N_i}^{N_s} (x_{u;d}(n) - \bar{x}_{u;d})(x_{v;d}(n) - \bar{x}_{v;d}) \quad (4)$$

eşitliği ile tanımlanabilir [8-10]. Burada $\bar{x}_{u;d}$ 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.

Eşitlik 2 ile tanımlanan OYF fonksiyonları kullanılarak u ve v istasyonları arasındaki simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (KLD) Eşitlik 5'te ifade edilmiştir [8-12].

$$KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) = K(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) + K(\hat{\mathbf{P}}_{v;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) \quad (5)$$

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:

$$K(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{v;d}) = \sum_{n=N_i}^{N_s} \hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n) \ln \left(\frac{\hat{\mathbf{P}}_{u;d}(n)}{\hat{\mathbf{P}}_{v;d}(n)} \right) \quad (6)$$

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

eşitlikleri ile tanımlanmıştır. Yine Eşitlik 2 ile tanımlanmış olan deneysel OYF kullanılarak u ve v istasyonları için L2-Norm (L2N), aşağıdaki denklemle ifade edilmiştir [8-10,13]:

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

Tablo 1'de verilen depremler için Tablo 2'de yer alan her bir istasyonun, iyonosferin sakın günlerinden elde edilmiş olan TEİ değerleri ile Eşitlik 3 ile verilen OGS vektörü hesaplanmıştır. OGS vektörü ile elde edilen $\hat{\mathbf{P}}_{u;d_1-d_s}$ kullanılarak her bir istasyonun deprem ve sakın gün veri setleri üzerinde $r(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d_1-d_s})$, $KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d_1-d_s})$ ve $L2N(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d_1-d_s})$ fonksiyonları kullanılarak OSG karşılaştırılması yapılmıştır. Tablo 2'de yer alan her bir istasyonun deprem ve sakın dönemindeki d. ve d+1. ardışık günleri, $r(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1})$, $KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1})$ ve $L2N(\hat{\mathbf{P}}_{u;d}; \hat{\mathbf{P}}_{u;d+1})$ fonksiyonları uygulanarak karşılaştırılmıştır. Bu bölümde önerilen yöntemlere ait uygulamalar Bölüm 3'te sunulmuştur.

3. Sonuçlar

Bölüm 2'de anlatılan istatistiksel yöntemler, deprem öncesi sismik hareketliliğin iyonosfer üzerindeki etkilerini saptayabilmek için TEİ veri setleri üzerinde uygulanmıştır. Veri setleri için iki grup zaman aralığı seçilmiştir. İlk olarak, Güneş'te meydana gelen hareketliliğe bağlı olarak jeomanyetik hareketliliğin yaşanmadığı sakın günler zaman aralığı saptanmıştır. Bunun için jeomanyetik hareketliliği ölçeklendiren D_{st} , K_p ve A_p indisleri göz önüne alınarak sakın günler seçilmiştir. İkinci olarak, her iki depremde de her

bir YKS istasyonu için deprem gününden on gün öncesi ve sonrası zaman aralığındaki günlerden TEİ değerleri elde edilmiştir. Her iki depremdeki 21 günlük zaman aralığı boyunca önemli sayılabilecek bir jeomanyetik hareketlilik yoktur. Kp indisinin en büyük değeri 4 civarındadır. Bu anlamda deprem günleri zaman aralığı da jeomanyetik açıdan oldukça sakinidir. Analiz yöntemleri üç farklı uygulama grubu içinde kullanılmıştır. Çalışmanın amacı için Türkiye’de meydana gelen farklı ölçekteki iki deprem seçilmiştir. Her iki deprem de Kuzey Anadolu Fay hattı üzerinde bulunup benzer jeofiziksel özellikler taşımaktadır. Depremlerin tarihi, oluş zamanı, konumu ($^{\circ}K-^{\circ}D$), ölçüğü (M-Richter) ve derinliği (z-km) Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 2’de E1 ve E2 olarak temsil edilen depremler sırasıyla 30.07.2009 tarihli Çağlayan/Erzincan [14] ve 08.08.2009 tarihli Çanakkale [15] depremidir.

Tablo 1: Depremlerin konum, zaman, büyüklük ve derinlik göstergesi

yer	tarih	saat	$^{\circ}K$	$^{\circ}D$	M	z
E1	30.07 2009	10 37	39.6	40.3	5	5
E2	08.08 2009	04 52	40.3	27.2	4.2	10

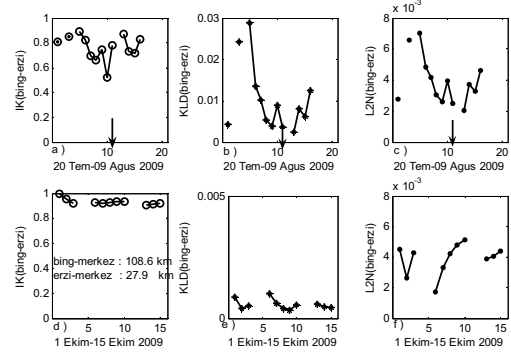
İyonosferin sakin olarak seçilen zaman aralığı 1 Ekim-15 Ekim 2009, OSG vektörü elde etmek için seçilen ikinci sakin zaman aralığı ise 1 Haziran-20 Haziran 2009’dur [16]. Bu çalışmada kullanılan Türkiye üzerine düzgün dağılmış TUSAGA Aktif YKS istasyonlarından elde edilen veriler üzerinden hesaplanan TEİ kestirimleri kullanılmıştır [1,2,17]. Kullanılan istasyonların konum ve kodları Tablo 2’de, alfabetik sıraya göre verilmiştir.

Tablo 2: TUSAGA aktif istasyonları ve koordinatları.

YKS İstasyonu	Alıcı Kodu	Enlem	Boylam
Ayvalık	ayvl	39.31°K	26.88°D
Bandırma	band	40.33°K	27.99°D
Bayburt	bayb	40.25°K	40.19°D
Bingöl	bing	39.08°K	40.83°D
Çanakkale	cana	40.11°K	26.41°D
Erzincan	erzi	39.74°K	39.50°D
Refahiye	rhiy	39.90°K	38.77°D
Tekirdağ	tekr	40.95°K	27.49°D
Yenice	yenc	39.93°K	27.24°D

İlk grup çalışmada, Eşitlik 3, 5 ve 7, E1 depreminde bayb, bing, erzi, rhiy ve E2 depreminde ayvl, band, cana, tekr, yenc istasyonlarının TEİ değerleri arasında uygulanmıştır. Bu grup çalışmaya göre her iki depremde kullanılan istasyonların çaprazlama İK değerleri sakin günlerde +1’e yakın iken deprem günlerinde +0.5 değerine kadar düşmüştür. İstasyonların deprem dönemi çaprazlama KLD değerlerinin sakin günlerde elde edilen değerlerden 10 kat büyük olduğu gözlenmiştir. İstasyonlar arası L2N değerleri hem deprem dönemlerinde hem de sakin dönemlerde 0 ile 0.005 arasında değişmiştir. L2N yöntemi, deprem dönemi ile sakin dönemde istasyonlar arasındaki farkı ölçmemiştir. Şekil 1’de deprem merkezine uzaklıkları sırasıyla 108 km ve 27 km olan bing ve erzi istasyonlarının deprem ve sakin dönemlerdeki çaprazlama İK, KLD ve L2N değerleri verilmiştir. İK değerlerinin deprem döneminde çok düşük olduğu (Şekil 1a) ve deprem dönemi

KLD değerlerinin (Şekil 1b) sakin dönemin (Şekil 1e) nerdeyse 10 katı olduğu Şekil 1’den gözlenmektedir. L2N değerlerinin deprem ve sakin dönemde aynı aralıkta değiştiği yine Şekil 1c ve 1f’de görülmektedir. Depremin olduğu 11. gün Şekil 1a, 1b ve 1c’de ok ile gösterilmiştir.

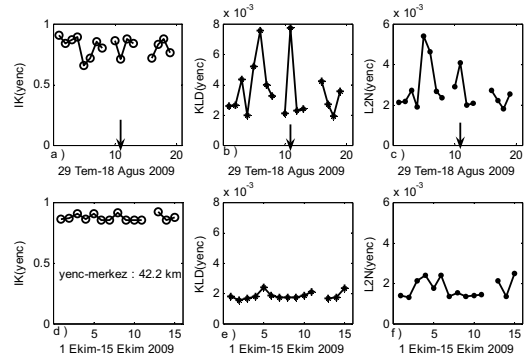


Şekil 1: bing-erzi istasyonları arası a) E1 dönemi İK, b) E1 dönemi KLD, c) E1 dönemi L2N, d) sakin dönem İK, e) sakin dönem KLD, f) sakin dönem L2N değerleri.

İkinci grup çalışmada $r(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d_1-d_s})$,

$KLD(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d_1-d_s})$ ve $L2N(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d_1-d_s})$ fonksiyonları

Tablo 2’de yer alan her bir istasyonun OSG vektörü ile deprem dönemi ve sakin dönem günleri arasında uygulanmıştır. Bu grup çalışmaya İK değerleri hem OSG-deprem hem de OSG sakin eşleşmesi için 0.8 ile 1 arasında değişmiştir. Deprem öncesi bazı günlerde İK değerleri 0.6’ya kadar düşmüştür. KLD ve L2N değerleri bu uygulamada paralel sonuçlar vermiştir. OSG-deprem eşleşmesinin KLD ve L2N değerleri, OSG-sakin eşleşmesi değerlerinden çok daha büyük çıkmıştır. KLD ve L2N değerlerinde özellikle OSG-deprem eşleşmesinde ani artışlar gözlenmiştir. Şekil 2’de deprem merkezine 42 km mesafede bulunan yenc istasyonuna ait İK, KLD ve L2N değerleri verilmiştir. KLD ve L2N değerlerinin OSG-deprem dönemi değerlerinin (Şekil 2b, 2c) OSG-sakin günler değerlerinden (Şekil 2d, 2e) çok daha büyük olduğu ve İK değerlerinin OSG-deprem eşleşmesinde (Şekil 2a, 2d) zayıf ilinti sergilediği görülmektedir. Depremin olduğu 11. gün Şekil 2a, 2b ve 2c’de ok ile gösterilmiştir.

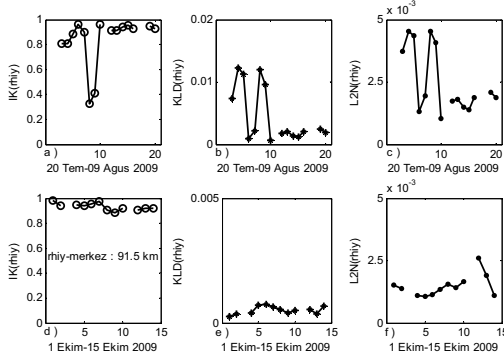


Şekil 2: yenc istasyonu için a) OSG-E2 İK, b) OSG-E2 KLD, c) OSG-E2 L2N, d) OSG-sakin İK, e) OSG-sakin KLD, f) OSG-sakin L2N değerleri.

Üçüncü grup olarak $r(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d+1})$, $KLD(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d+1})$

ve $L2N(\hat{P}_{u,d}; \hat{P}_{u,d+1})$ fonksiyonları Tablo 2’de yer alan her bir

istasyonun ardışık deprem günleri ve sakin günleri arasında uygulanmıştır. Bu uygulamayla, ardışık sakin günler arasındaki İK değerleri +1'e yakın değişirken, ardışık deprem günlerinde değerler +0.2'ye kadar düşerek zayıf iliti sergilemiştir. Ardışık deprem günleri KLD değerleri, ardışık sakin günlerin değerlerinden 10 kat büyük çıkmıştır. Paralel olarak ardışık deprem günlerindeki L2N değerleri, ardışık sakin günlerden yaklaşık olarak 2 kat büyük olarak gözlenmiştir. Bu uygulamada her üç yöntem de ardışık deprem günleri arasındaki farkı büyük olarak ölçmüştür ve sakin günlerden ayırmıştır. Şekil 3'te, deprem merkezine 91 km uzaklıkta bulunan rhyi istasyonunun ardışık deprem ve sakin günlerinde elde edilmiş İK, KLD ve L2N değerleri verilmiştir. Ardışık deprem günlerindeki İK değerlerinin (Şekil 3a), deprem gününden bir ve iki gün önce ani düşüşle 0.2'ye kadar indiği görülmektedir. Ardışık deprem günlerindeki KLD değerlerinin (Şekil 3b) özellikle deprem öncesi günlerde ardışık sakin günler değerlerinin (Şekil 3e) 10 katı büyüklükte olduğu gözlenmektedir. Deprem günlerindeki L2N değerlerinin sakin günlerden çok çok büyük olduğu yine Şekil 3c ve 3f'de görülmektedir.



Şekil 3: rhyi istasyonu için ardışık E1 günlerindeki a) İK, b) KLD, c) L2N; ardışık sakin günlerindeki d) İK, e) KLD, f) L2N değerleri.

4. Tartışma

Bu çalışmada, sismik hareketliliğin ionosferde meydana getirdiği bozulma etkileri, TUSAGA Aktif ağında yer alan YKS istasyonlarından kestirilen TEİ değerleri kullanılarak incelenmiştir. İnceleme için İK, KLD ve L2N olmak üzere dört farklı istatistiksel analiz yöntemi, daha önce yapılmış olan çalışmalara [10-12] benzer olarak üç farklı uygulama grubu içinde kullanılmıştır. Kuzey Anadolu Fay hattı üzerinde meydana gelen benzer jeolojik özelliklere sahip Çanakkale ve Erzincan depremleri inceleme kapsamında ele alınmıştır. İnceleme zaman aralıkları olarak kullanılan her bir TUSAGA istasyonunun depremden 10 gün öncesi ve sonrası olmak üzere 21 günlük deprem aralığı ile jeomanyetik ve sismik açıdan hareketliliğin yaşanmadığı, ionosferin sakin olduğu 15 günlük zaman aralığı seçilmiştir. Kullanılan istasyonlar bu bağlamda yapılmış olan daha önceki çalışmalara göre deprem merkezlerine ve birbirine çok yakındır. Buna bağlı olarak istasyonlar arası çaprazlama uygulamasında daha önceki çalışmalarda deprem ve sakin günler arasındaki farkı ölçemeyen İK yöntemi, bu çalışmada deprem günlerini sakin günlerden ayırmıştır. KLD ve L2N yöntemi önceki çalışmalarda birbirlerine paralel sonuçlar ortaya koyarken bu çalışmada deprem bozulmasını çaprazlama uygulamasında KLD yöntemi ölçmüş, L2N yöntemi de ölçmemiştir. İK

yöntemi daha önceki çalışmaların OSG eşleşmelerinde ayrıt edici değilken, Türkiye üzerinden elde edilen sonuçlarda ayrıt edici olmuştur. KLD ve L2N yöntemleri ise önceki çalışmalara kıyasla OSG ve ardışık günler uygulamasında Türkiye üzerindeki değerlendirmede daha ayrıt edici olmuştur. Türkiye üzerindeki YKS alıcılarının birbirine yakın olması bu çalışmada avantaj sağlamıştır. Bu nedenle bu çalışmayla, Türkiye üzerinde yer alan farklı fay hatlarında meydana gelmiş ve farklı sismik, jeolojik özelliklere sahip depremlerin incelenmesi gerekliliği ortaya konmuştur.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK EEEAG 109E055 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

5. Kaynakça

- [1] Arıkan, F., Erol, C.B. and 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.
- [2] Nayir, H., Arıkan, F., Arıkan, O. and Erol, C.B., "Total electron content estimation with Reg-Est", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 122: A11313, 2007.
- [3] Ondoh, T., "Seismo-ionospheric phenomena", *Advances in Space Research*, 26(8): 1267-1272, 2000.
- [4] Pulnits, S.A., "Ionospheric precursors of earthquakes; recent advances in theory and practical applications", *TAO*, 15(3): 413-435, 2004.
- [5] Liu J.Y., Chen, Y.I., Pulnits 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] Chuo. Y.J., Chen, Y.I., Liu, J.Y. and Pulnits, S.A., "Ionospheric f_oF_2 variations prior to strong earthquakes in Taiwan area", *Advances in Space Research*, 27(6):1305-1310, 2001.
- [7] Trigunait, A., Parrot, M., Pulnits, S.A. and Li, F., "Variations of the ionospheric electron density during the Bhuj seismic event", *Annales Geophysicae*, 22(12): 4123-4131, 2004.
- [8] Karatay, S., Arıkan, F. and Arıkan, O., "Toplam Elektron İçeriği ile Litosfer-İyonosfer Bağlaşımının İncelenmesi", *SIU-2009*, Antalya, Türkiye, 9-11 Nisan 2009.
- [9] Arıkan, F., Karatay, S. And Arıkan, O., "Investigation of ionospheric disturbance due to strong earthquakes using total electron content", *Proceedings of EGU-2009*, Vienna, Austria, 19-24 April 2009.
- [10] Karatay, S., Arıkan, F. And Arıkan, O., "Investigation of hourly and daily patterns for Lithosphere-Ionosphere coupling before strong earthquakes", *Proceedings of RAST-2009*, İstanbul, Turkey, 11-13 June 2009.
- [11] Cover, T.M. and Thomas, A.J. *Elements of Information Theory*, Wiley Interscience Publishers, New York, 2006.
- [12] Hall, P., "On Kullback-Leibler loss and estimation", *The Annals of Statistics*, 15(4): 1491-1519, 1987.
- [13] Kreyszig, E., *Advanced Engineering Mathematics*, John Wiley & Sons Inc. Publishers, New York, 1988.
- [14] www.koeri.boun.edu.tr
- [15] www.earthquake.usgs.gov
- [16] http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/indices/old_indices
- [17] www.ionolab.org