

# İYONKÜRE ELEKTRON İÇERİĞİ KULLANILARAK DEPREM ÖNCÜL TESPİT SİNYALİ OLUŞTURULMASI

## GENERATION OF EARTHQUAKE DETECTION SIGNAL BASED ON IONOSPHERIC ELECTRON CONTENT VARIATION

Ali Alp Akyol, Orhan Arıkan  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
İhsan Doğramacı Bilkent Üniversitesi  
{akyol,orikan}@ee.bilkent.edu.tr

Feza Arıkan  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Hacettepe Üniversitesi  
arikan@hacettepe.edu.tr

**Özetçe** —Sismik olayların iyonküredeki elektron dağılımını etkilediği ve bu etkinin bir kaynağının sismik hareketlilik öncesi kayaçların sıkışması sonucu kayaç yüzeylerinde oluşan elektrik alanın yol açtığı iyonlaşma olduğu yakın zamanda yapılan deneyler ile gösterilmiştir. Sismik olayların yol açtığı bu tür bir etkinin iyonkürenin dinamik yapısı içinde güvenilir şekilde tespit edilebilmesi depremlerin erken tahminini sağlayabilecek önemdedir. Bu çalışmada bir YKS alıcı ağından düzenli olarak elde edilen Toplam Elektron İçeriği (TEİ) ölçümleri kullanılarak iyonküredeki yerel değişimlerin tespit edilmesine yönelik bir teknik geliştirilmiş ve bu tekniğin güvenilir bir deprem öncül sinyali üretip üretmediği 2010 ve 2011 yıllarını kapsayan bir zaman aralığında test edilmiştir. Geliştirilen deprem öncül tespiti tekniğinin bu tarih aralığında Türkiye’de Richter ölçeğinde 5 ve üzeri büyüklükte meydana gelen 23 depremin 15’ini tespit edebildiği ve 8 yanlış alarm verdiği gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler**—*Toplam Elektron İçeriği (TEİ), Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS)*

**Abstract**—Recent studies enlightened the fact that seismic activities cause variations on ionospheric electron content based on electrical fields around stressed rock formations triggering ionization on air and ionosphere. Robust detection of seismic activity triggered variations in dynamic state of the ionosphere has a significant effect on early detection of earthquakes. In this study, a technique based on using Total Electron Content (TEC) measurements obtained from a GPS network and detecting local ionospheric variations is proposed. Reliability of generating an earthquake detection signal by implementing proposed technique is tested over a period of 2 years in 2010 and 2011. It is observed that proposed earthquake detection technique is able to detect 15 out of 23 earthquakes of magnitude larger than 5 in Richter scale while generating 8 false alarms within this time period around Turkey.

**Keywords**—*Total Electron Content (TEC), Global Positioning System (GPS)*

### I. GİRİŞ

İyonküre atmosferin, yeryüzünden yaklaşık 85-1000 km yükseklik aralığında yer alan, yüksek enerjili gaz atomlarının ve moleküllerinin son yörüngelerinde bulunan elektronların atom ve moleküllerden ayrılarak serbest hale geçmesiyle oluşmuş nötr plazma bir katmandır. Kısa Dalga (KD) ve uydu haberleşme sistemlerinin çalışabilmesi için büyük bir öneme sahip

olan iyonküre, iletişim sistemlerinin etkin kullanımı amacıyla yakından takip edilmelidir [1].

Yapılan araştırmalar, sismik hareketlerin başlangıcından depremin olduğu güne kadar iyonküre elektron yoğunluğunun değiştiğini göstermektedir [2], [3]. Yerkabuğundaki hareketlerin kayaçların yapısına bağlı olarak güçlü elektrik akımları oluşturabildiği ve bu güçlü elektrik akımlarının havayı iyonize ederek iyonküre elektron yoğunluğunu değiştirdiği gösterilmiştir [4], [5].

Kayaçların sıkışması sonucu iyonküredeki olası değişimin tespiti deprem öncül sinyali oluşturmak için çok önemlidir. Bu amaçla bu çalışmada iyonküredeki Toplam Elektron İçeriği (TEİ) dağılımı üzerinde meydana gelen yerel beklenmeyen boyutlardaki değişimlerin güvenilir olarak tespit edilmediği incelenmiştir. TEİ değerlerinin kestirimi için hassas konumlama amacıyla kurulmuş Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS), GLONASS ve TOPEX/Poseidon ağ sistemleri kullanılmaktadır. Konumlama amacıyla uydulardan gönderilen ve atmosferden geçerek ağda yer alan yer istasyonlarına ulaşan bu sinyaller arasındaki faz farkı kullanılarak iyonküre TEİ kestirimleri anlık olarak elde edilebilmektedir [6]. Harita Genel Komutanlığı tarafından Türkiye üzerine konuşlandırılmış TUSAGA-Aktif YKS alıcı ağındaki 144 istasyonun 2009 ve 2011 yılı verileri kullanılarak TEİ değerlerinin kestirilmesi ve elde edilen kestirimler ile ilgili istasyondaki TEİ ölçümü arasındaki farkı ölçmeye dayanan bu teknik, beklenenin ötesindeki TEİ değişimlerini gösterebilecek deprem öncül sinyali oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada güvenilir bir deprem öncül sinyali üretip üretmediği 2010 ve 2011 yıllarını kapsayan bir zaman aralığında test edilmiştir.

### II. ÖNERİLEN DEPREM ÖNCÜL TESPİT YAPISI

Bu bölümde TEİ dağılımındaki değişimlerin tespitine dayalı deprem öncül tespit tekniği detaylandırılacaktır. Yerel TEİ değişimlerinin güvenilir gözlemini sağlamak için deprem öncül sinyalleri, beklenenin ötesinde olan yerel TEİ değişimlerinin tespiti için ise deprem tahmin eşikleri oluşturulmaktadır. Önerilen deprem öncül tespit yapısı aşağıda sunulan bölümlerden oluşmaktadır.

### A. TUSAGA-Aktif YKS Alıcıları Ağı

TUSAGA-Aktif YKS Alıcıları Ağı üzerindeki yaklaşık olarak düzgün dağılmış Şekil 1'de gösterilen 144 gözlem istasyonundan sürekli veri alınarak anlık TEİ değerleri hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada ağ üzerindeki her bir istasyondan elde edilen faz ölçümleri Düzgünleştirilmiş TEİ (D-TEİ) yöntemiyle işlenerek 2.5 dakikada bir elde edilen TEİ kestirimleri kullanılmıştır [7].



Şekil 1: TUSAGA-Aktif YKS alıcı istasyonları.

Ağ üzerinde yer alan istasyonların tümünde her zaman veri alınması çeşitli nedenlerle mümkün olmamaktadır. Bu nedenle, güvenilir TEİ kestirimlerinin elde edildiği istasyonlar belirlenmekte ve deprem öncül sinyali oluşturmasında bu veriler kullanılmaktadır.

### B. Özgün Uzaysal Aradeğerlendirme

Bu bölümde yerel TEİ değişimini tespit amacıyla geliştirilen özgün bir uzaysal aradeğerleme tekniği sunulmaktadır. Geliştirilen uzaysal aradeğerlendirme, TUSAGA-Aktif-YKS ağı üzerindeki istenen bir istasyonun istenen bir tarihteki TEİ değerlerini kestirmeyi amaçlar. Kestirimde belirlenmiş istasyona uzaklıkları belirli bir mesafenin altında olan istasyonlar "komşu istasyon" olarak adlandırılır ve bu istasyonlardan elde edilen TEİ verileri kullanılarak istenilen istasyonun TEİ değeri kestirilir. Ağ üzerinde seçilen bir  $u$  istasyonu için günlük TEİ vektörü:

$$x_{u;d} = [x_{u;d}(1) \cdots x_{u;d}(n) \cdots x_{u;d}(N_{u;d})]^T, \quad (1)$$

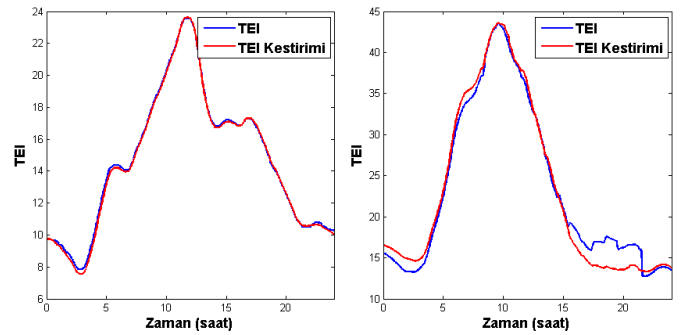
şeklinde ifade edilebilmektedir. Burada  $x_{u;d}(n)$  seçilmiş olan bir  $u$  istasyonunun  $d$ . gün içindeki  $n$ . TEİ değeridir ve  $N_{u;d}$ 'de günlük ölçüm sayısıdır. Belirlenmiş bir  $u$  istasyonu için, mesafesi  $R_r$ 'den daha yakın olan komşu istasyonların sayısı  $N_{u;R_r}$  ise, TEİ kestirimi aşağıdaki şekilde yapılabilir:

$$\hat{x}_{u;d;R_r} = \sum_{v=1}^{N_{u;R_r}} \alpha_{u;d;R_r}(v) x_{v;d;R_r}. \quad (2)$$

Burada  $\alpha_{u;d;R_r}(v)$ , belirlenmiş  $u$  istasyonun  $d$ . günde  $R_r$  km. komşuluğunda kalan  $N_{u;R_r}$  tane komşusundan,  $v$ . komşusunun TEİ değerinin katsayısıdır;  $x_{v;d;R_r}$  ise  $v$ . komşusunun TEİ değeri vektörüdür.  $\alpha_{u;d;R_r}(v)$  katsayıları arşiv verisi üzerinde seçilmiş bir gün aralığı üzerindeki kestirim hatasının enküçülenmesi ile bulunabilir. Enküçülenecek kestirim hatası (3)'te gösterilen şekilde yazılabilir:

$$\min_{\alpha_{u;d;R_r}(v)} \sum_{d_i}^{d_s} \left\| x_{u;d_n} - \sum_{v=1}^{N_{u;R_r}} \alpha_{u;d;R_r}(v) x_{v;d_n;R_r} \right\|_2^2. \quad (3)$$

Burada  $d_i$  günden başlayarak  $d_s$ . güne kadar olan geçmiş veride karşılaşılan kestirim hatalarının toplam enerjisini enküçültülecek  $\alpha_{u;d;R_r}(v)$  katsayıları bulunması amaçlanmaktadır. (3)'te verilen kestirim hatasını enküçükleyen katsayıları hesaplamak mümkündür [8]. Sonuç olarak yerel TEİ kestirimi  $\hat{x}_{u;d;R_r}$ , (2) ve enküçüklenmiş  $\alpha_{u;d;R_r}(v)$  katsayıları kullanılarak hesaplanabilir ve bu hesaplama sonucunda yerel TEİ değişimi  $\hat{x}_{u;d;R_r}$  ve  $x_{u;d}$  değerlerinin kıyaslanmasıyla saptanabilir. Şekil 2'de iki farklı gün ve istasyon için hesaplanmış zamanda ve uzayda farklılıklar gösteren TEİ kestirimleri ve TEİ değerleri gösterilmektedir. Tablo 1'de gösterildiği üzere 27.10.2011 tarihinde meydana gelen 5.6 büyüklüğündeki depremden bir gün önce, 26.10.2011 tarihinde "trbn" istasyonundaki TEİ değerinde beklenenin ötesinde bir değişiklik gözlemlenmiştir. Bu ve bunun gibi değişikliklerin otonom gözlemini sağlayacak deprem öncül sinyali için önerilen bir sinyal işleme yapısı bir sonraki bölümde sunulacaktır.



Şekil 2: "deni" istasyonu 21.04.2010 tarihi (solda) ve "trbn" istasyonu 26.10.2011 tarihi (sağda) için TEİ kestirimleri.

### C. Deprem Öncül Sinyali Oluşturulması

Beklenenin ötesindeki yerel TEİ değişiminin güvenilir gözlemine yönelik olarak var olan ölçümleri ve onların kestirimlerini kullanan birçok metrik denenmiş ve bu çalışmada kullanılmak üzere Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (SKLM) seçilmiştir. SKLM yaygın olarak iki Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) arasındaki farkın bir ölçütü olarak kullanılan bir metriktir. TEİ ölçümleri pozitif değerler aldığı için, aşağıdaki şekilde bir düzgeleme ile OYF'lere dönüştürülebilir. Belirlenmiş istasyonunun gündeki TEİ değerinin OYF'si (4) ve komşuluklardan kestirilen TEİ değerinin OYF'si (5) kullanılarak elde edilebilir:

$$P_{u;d} = x_{u;d} \left( \sum_{n=1}^{N_{u;d}} x_{u;d}(n) \right)^{-1}, \quad (4)$$

$$\hat{P}_{u;d;R_r} = \hat{x}_{u;d;R_r} \left( \sum_{n=1}^{N_{u;d}} \hat{x}_{u;d;R_r}(n) \right)^{-1}. \quad (5)$$

Bu eşitlikler kullanılarak sırasıyla  $\hat{P}_{u;d;R_r}$ 'den  $P_{u;d}$ 'ye olan Kullback-Lieber Mesafesi (KLM) (6)'da ve  $P_{u;d}$ 'den  $\hat{P}_{u;d;R_r}$ 'ye olan KLM (7)'de gösterildiği gibi hesaplanabilir:

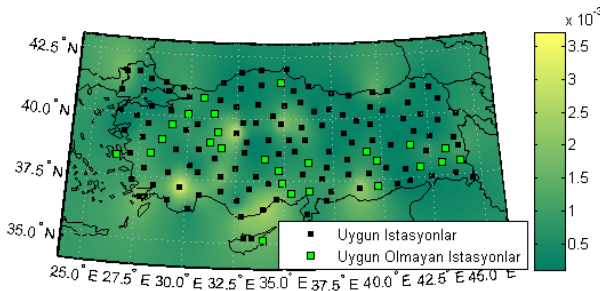
$$KLM(\hat{P}_{u;d;R_r}|P_{u;d}) = \left( \sum_{n=1}^{N_{u;d}} \hat{P}_{u;d;R_r}(n) \ln \left( \frac{\hat{P}_{u;d;R_r}(n)}{P_{u;d}(n)} \right) \right), \quad (6)$$

$$KLM(P_{u;d}|\hat{P}_{u;d;R_r}) = \left( \sum_{n=1}^{N_{u;d}} P_{u;d}(n) \ln \left( \frac{P_{u;d}(n)}{\hat{P}_{u;d;R_r}(n)} \right) \right). \quad (7)$$

(6) ve (7) ile ifade edilen KLM'leri toplanarak TEİ değerleri arasındaki SKLM elde edilir:

$$SKLM(P_{u;d}; \hat{P}_{u;d;R_r}) = KLM(\hat{P}_{u;d;R_r}|P_{u;d}) + KLM(P_{u;d}|\hat{P}_{u;d;R_r}). \quad (8)$$

Bu teknik kullanılarak, her bir istasyon için elde edilmiş yerel değişim değerlerinden oluşan deprem öncül sinyalinin güvenilir gözlemlenmesi amacıyla iki boyutlu aradeğerlendirme yöntemi olan Kriging kullanılarak Türkiye'yi kapsayan bir TEİ değişim haritası oluşturulmuştur. Şekil 3'te 20.10.2011 tarihi için deprem öncül sinyali değerlerinin 2 boyutlu aradeğerlendirilmesi sonucu elde edilmiş TEİ değişim haritası gösterilmiştir.



Şekil 3: 20.10.2011 tarihi için deprem öncül sinyali kullanılarak elde edilmiş TEİ değişim haritası.

#### D. Deprem Tahmin Eşikleri Oluşturulması

Deprem öncül sinyali üzerindeki beklenenin ötesindeki değişikliklerin gürbüz şekilde kestirilmesi için yanlış alarm olasılığını istenilen seviyede tutacak deprem tahmin eşikleri oluşturulmalıdır. Bu çalışmada, yanlış alarm olasılıklarını incelemek amacı ile zamansal olarak sabit, uzaysal deprem tahmin eşikleri ve uzaysal olarak sabit, zamansal deprem tahmin eşikleri oluşturulmuştur. Yanlış alarmı kontrol altında tutmak amacıyla belirlenecek eşikler önemli seviyede sismik hareketliliğin bulunmadığı günlerin verileri kullanılarak belirlenmektedir. Bu amaçla, tahmin yapılacak olan günler sismik hareketliliğin olduğu ve olmadığı günler olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Bu çalışmada, deprem tahmin eşikleri sismik hareketliliğin olmadığı günler sınıfının yerel TEİ değişimleri kullanılarak oluşturulmuştur.

Uzaysal deprem tahmin eşikleri, YKS ağındaki her bir istasyonun sismik hareketliliğin olmadığı günler sınıfındaki yerel TEİ değişimleri için kesilmiş Pareto tamamlayıcı birikimli dağılım fonksiyonu kestirimi kullanılarak oluşturulabilir [9]. Kesilmiş Pareto rassal değişkeni  $X$  ise tamamlayıcı birikimli dağılım fonksiyonu  $\gamma$ ,  $v$  ve  $\alpha$  değişkenlerine bağlı olup aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$1 - F_X(x) = P(X > x) = \frac{\gamma^\alpha (x^{-\alpha} - v^{-\alpha})}{1 - \left(\frac{\gamma}{v}\right)^\alpha}. \quad (9)$$

Bu ifadede yer alan  $\gamma$ ,  $v$  ve  $\alpha$  değişkenleri için maksimum olasılık kestirimi kullanılarak tamamlayıcı birikimli dağılım

fonksiyonu elde edilebilir. Belirli bir  $u$  istasyonunda sismik hareketliliğin olmadığı  $n$  gün için yerel TEİ değişimlerinin büyükten küçüğe doğru sıralı hal:

$$T_u = [T_u(1) \cdots T_u(i) \cdots T_u(n)], \quad (10)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir.  $\gamma$  ve  $v$  değişkenleri için maksimum olasılık kestirimleri:

$$\hat{\gamma} = T_u(n) = \min(T_u(1), T_u(2), \dots, T_u(n)), \quad (11)$$

$$\hat{v} = T_u(1) = \max(T_u(1), T_u(2), \dots, T_u(n)), \quad (12)$$

olarak seçildiğinde  $\alpha$  değişkeni için maksimum olasılık kestirimi, (13)'ü çözen  $\hat{\alpha}$  değeridir:

$$\frac{n}{\hat{\alpha}} + \frac{n \left(\frac{\hat{\gamma}}{\hat{v}}\right)^{\hat{\alpha}} \ln \left(\frac{\hat{\gamma}}{\hat{v}}\right)}{1 - n \left(\frac{\hat{\gamma}}{\hat{v}}\right)^{\hat{\alpha}}} - \sum_{i=1}^n [\ln(T_u(i)) - \ln(\hat{\gamma})] = 0. \quad (13)$$

$\hat{\gamma}$ ,  $\hat{v}$ ,  $\hat{\alpha}$  ve  $T_u$  vektörü (9) için kullanılarak Pareto tamamlayıcı birikimli dağılım fonksiyonu kestirimi tamamlanır. Bu sayede sismik hareketliliğin olmadığı günlerde, her bir YKS istasyonundaki herhangi bir yerel TEİ değişiminin hangi olasılıkla meydana geldiği bulunabilmektedir.

Zamansal deprem tahmin eşikleri ise, seçilmiş bir gün için TUSAGA Aktif YKS ağındaki tüm istasyonların yerel TEİ değişimlerinin medyanı ve standart sapması hesaplanarak oluşturulmaktadır. Seçilmiş bir  $d$  günü için ağıdaki tüm istasyonların yerel TEİ değişim medyanı  $M_d$  ve yerel TEİ değişim standart sapması  $S_d$  ise bu gün için belirlenmiş zamansal deprem tahmin eşiği:

$$ZTE_d = M_d + \beta S_d, \quad (14)$$

olarak hesaplanır.  $\beta$  parametresi sabit tutularak zamansal deprem tahmin eşiği tahmin yapılacak olan gün aralığında her bir gün için hesaplanarak bulunur.

Bir sonraki bölümde, yanlış alarm olasılığını kontrol edecek şekilde oluşturulmuş uzaysal ve zamansal deprem tahmin eşiklerinin, Türkiye ve çevresinde 2011 yılında meydana gelmiş 23 deprem üzerindeki özgün ve birleşik başarımları incelenecektir.

### III. DEPREM ÖNCÜL TESPİT BAŞARIMININ İNCELENMESİ

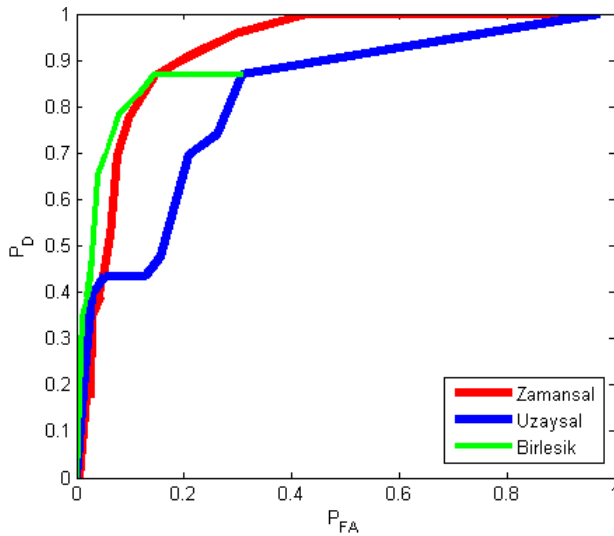
Deprem öncül tespit başarımının değerlendirilmesi amacıyla, Türkiye ve çevresinde 2011 yılında meydana gelmiş büyüklüğü 5 ve üzerindeki Tablo I'de gösterilen 23 deprem incelenmiştir. Yanlış alarmın kontrol edildiği farklı zamansal deprem tahmin eşikleri ve uzaysal deprem tahmin eşikleri, arşivlenmiş ve beklenenin ötesindeki yerel TEİ değişimlerinin tespitine olanak sağlayan deprem öncül sinyaline uygulanmıştır.

Beklenenin ötesindeki yerel TEİ değişimlerinin tespitinde 2011 yılı günleri sismik hareketlilik olan ve olmayan olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Sismik aktivite günleri grubu meydana gelen 23 deprem için deprem günlerini ve depremler olmadan önceki 9 günlük zaman aralığındaki günleri içermektedir. Sismik aktivite olmayan günler grubunda 211 gün bulunmaktadır ve büyüklüğü 5 ve üzeri herhangi bir

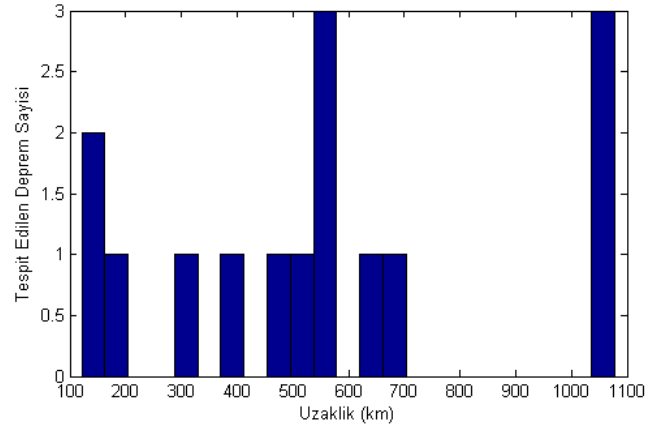
Tarih (gg.aa.yyyy)	Saat (ss:dd)	Merkez Üssü		Büyüklik (Richter)	Derinlik (km)
		Enlem	Boylam		
19.01.2011	09:17	41.8770	42.7038	5.3	27.81
28.02.2011	07:49	34.7417	25.3913	5.5	25.42
01.04.2011	13:29	35.4819	26.4011	6.2	8.99
19.05.2011	20:15	39.1328	29.0820	5.7	24.46
23.06.2011	07:34	38.5562	39.6307	5.3	13.42
27.06.2011	21:13	39.1108	29.0260	5.0	18.27
25.07.2011	17:57	40.8195	27.7498	5.1	6.97
18.08.2011	14:57	42.3595	43.0042	5.0	15.5
13.09.2011	16:19	34.4090	23.7220	5.0	5.00
14.09.2011	03:35	37.2030	22.0120	5.0	35.05
22.09.2011	03:22	39.6597	38.6777	5.4	7.18
27.09.2011	12:08	34.1700	23.6200	5.2	40.43
10.10.2011	19:07	37.2050	22.0600	5.1	5.00
23.10.2011	10:41	38.6890	43.4657	6.7	19.02
24.10.2011	08:49	38.7060	43.5823	5.0	17.27
25.10.2011	14:55	38.8230	43.5857	5.4	17.44
27.10.2011	08:04	37.3807	43.8343	5.6	21.61
08.11.2011	22:05	38.7192	43.0778	5.4	8.36
09.11.2011	19:23	38.4382	43.2825	5.6	21.47
14.11.2011	22:08	38.7038	43.0833	5.1	23.32
18.11.2011	17:39	38.8022	43.8528	5.2	8.00
23.11.2011	12:18	35.4048	25.9317	5.0	6.96
30.11.2011	00:47	38.4700	43.2905	5.0	19.79

Tablo I: Türkiye ve çevresinde 2011 yılında meydana gelmiş büyüklüğü 5 ve üzerindeki 23 depremin sırasıyla: tarih, saat, merkez üssü, büyüklük, derinlik bilgileri.

deprem gözlemlenmemiştir. Şekil 4, yanlış alarmın kontrol edilerek uzaysal deprem tahmin eşikleri ve zamansal deprem tahmin eşikleri için oluşturulmuş ROC (Receiver Operating Characteristic) eğrilerini göstermektedir. Seçilmiş bir zamansal deprem tahmin eşığı 23 depremden 10 tanesini önceden tahmin ederken 10 yanlış alarm üretmekte, seçilmiş bir uzaysal deprem tahmin eşığı ise 23 depremden 9 tanesini önceden tahmin ederken 6 yanlış alarm üretmektedir. Zamansal ve uzaysal deprem tahmin eşiklerinin tahminlerinin uyumlandırılması sonucu oluşturulan birleşik bir deprem tahmin eşığı diğer tekniklere göre üstün olup meydana gelmiş 23 depremden 15 tanesini önceden tahmin ederken 8 yanlış alarm üretmektedir. Şekil 5, meydana gelmeden önce tahmin edilmiş 15 deprem için en küçük deprem tahmin mesafeleri histogramıdır ve ortalama tahmin mesafesinin 554.5 km. olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4: Zamansal, uzaysal ve birleşik deprem tahmin eşikleri için ROC eğrileri.



Şekil 5: Tahmin edilen depremler için en küçük tespit mesafeleri.

#### IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, özgün uzaysal aradeğerlendirme yöntemi, Türkiye üzerine konuşturulmuş TUSAGA-Aktif YKS ağı üzerindeki 144 istasyona 2010-2012 tarihleri arasında kalan her gün için uygulanmış, TEİ kestirimleri arşivlenmiş, seçilmiş gün aralığında uygun hata ölçütüne (SKLM) göre deprem öncül tespit sinyalleri oluşturulmuş, deprem öncül tespit sinyalleri üzerinde beklenenin ötesindeki değişimlerin tespitleri yapılmıştır. Sonuç olarak, önerilen bir deprem öncül tespit tekniğinin 2011 yılında gerçekleşen büyüklüğü 5 ve üzerindeki 23 depremden 15 tanesini önceden tahmin ederken, tahminler sırasında sismik aktivitenin olmadığı 211 günden 8 günde yanlış alarm verdiği gözlemlenmiştir.

#### KAYNAKÇA

- [1] H. Nayir, "Ionospheric Total Electron Content Estimation Using GPS Signals," Master's thesis, Hacettepe University, 2007.
- [2] D. Ouzounov, S. Pulnits, A. Romanov, A. Romanov, K. Tsybulya, D. Davidenko, M. Kafatos, and P. Taylor, "Atmosphere-ionosphere response to the M9 Tohoku earthquake revealed by multi-instrument space-borne and ground observations: Preliminary results," *Earthquake Science*, vol. 24, no.6, pp.557-564, 2011.
- [3] A. Nangaladze, O. Zolotov, I. Zakharenkova, I. Shagimuratov, and O. Martynenko, "Ionospheric total electron content variations observed before earthquakes: Possible physical mechanism and modeling," arXiv preprint arXiv:0905.3313, 2009.
- [4] F. Freund, "Cracking the Code of Pre-Earthquake Signals," National Information Service for Earthquake Engineering, University of California, Berkeley, 2005.
- [5] C. Kuo, J. Huba, G. Joyce, and L. Lee, "Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges," *Journal of Geophysical Research*, vol. 116, no. A10, p. A10317, 2011.
- [6] A. Yildiz, O. Arıkan, and F. Arıkan, "Spatio-temporal interpolation of ionospheric TEC data," in *IEEE 19th Conference on Signal Processing and Communications Applications (SIU)*, pp. 817-820, 2011.
- [7] F. Arıkan, C. Erol, and O. Arıkan, "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data," *Journal of Geophysical Research*, vol. 108, no. A12, p. 1469, 2003.
- [8] Deviren, M. N., F. Arıkan, and O. Arıkan, "Spatio-temporal interpolation of total electron content using a GPS network", *Radio Sci.*, 48, 302-309, doi:10.1002/rds.20036, 2013.
- [9] I. B. Aban, M. M. Meerschaert, and A. K. Panorska, "Parameter estimation for the truncated Pareto distribution," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 101, no. 473, pp. 270-277, 2006.