GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Gümüşhane University Journal of Science and Technology Institute

GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ YAYINI

PUBLISHED BY GÜMÜŞHANE UNIVERSITY SCIENCE AND TECHNOLOGY INSTITUTE

ISSN 2146-538X | CİLT/VOLUME: 4 | SAYI/NUMBER: 1 | YIL/YEAR: 2014

Gümüşhane University Science and Technology Institute Bağlarbaşı Mahallesi 29100 Gümüşhane/TURKEY
gufbed@gumushane.edu.tr Tel: 0 456 233 75 36 Faks: 0 456 233 74 27

GÜFBED/GUSTIJ (2014) 4 (1): 107-116
Research/Araştırma

Toplam Elektron İçeriği (TEC) Değerleri ve Deprem İlişkisinin İncelenmesi

Mustafa ULUKAVAK*, Mualla YALÇINKAYA
Karadeniz Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

Geliş tarihi/*Received* 07.12.2013
Düzeltilerek geliş tarihi/*Received inrevised form* 17.01.2014
Kabul tarihi/*Accepted* 22.01.2014

Özet
Sismik aktivitelerin iyonosfer tabakası üzerindeki etkileri konusunda birçok araştırma yapılmaktadır. Depremin yıkıcı etkilerine karşı önlem alabilmek için depremin meydana geliş zamanının önceden kestirilebilmesi önemlidir. Yerkürede meydana gelen kabuk hareketlerinin etkileri sadece sarsıntı olarak değil insanoğlunun direkt algılayamadığı değişimlere de yol açmaktadır. Bu değişimler farklı yöntem ve cihazlarla tespiti yapılacak şekilde modellenebilmektedir. Bu yöntemlerin incelenmesindeki temel parametrelerden birisi de Toplam Elektron İçeriği (TEC) değerinin değişimidir. TEC, GPS alıcısı ile her bir GPS uydusu arasındaki sinyal yolunda bulunan toplam elektron sayısı olarak tanımlanır. İyonosferin radyo sinyalleri üzerindeki etkilerinden faydalanarak TEC parametresi ortaya çıkarılmıştır. Deprem öncüllerinin belirlenmesinde de deprem öncesi iyonosferde meydana gelen değişimlerin araştırılması bu açıdan yararlı olacaktır. Bu amaçla deprem öncesi ve sonrası iyonosferde meydana gelen değişimlerin GPS sinyallerinden elde edilen TEC değerleri ile beraber modellenerek aralarındaki ilişkinin ortaya çıkarılması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Toplam Elektron İçeriği (TEC), GPS, İyonosfer, Deprem Öncülleri.*

The Relationship Between Total Electron Content (TEC) Valuesand Earthquake

Abstract
Research has been done on the effects of seismic activity on a layer of the ionosphere. To counter act the devastating effects of the earth quake, occurrence time of the earthquake is important for pre-estimating. Effects occurring in the earthcrust cannot be detected only as a shake. These changes will be modeled with using different methods and devices. One of the main parameters of these methods is Total Electron Content (TEC) values change. TEC is defined as the total number of electrons in the signal path between the GPS receiver and each GPS satellite. Advantage of the effects of the ionosphere on radio signals revealed TEC parameter. Determination of earthquake precursors before the earthquake investigation, the changes in the ionosphere will be useful in this respect. For this purpose, before and after the earthquake, the changes in the ionospheric TEC values obtained from the GPS signals are required for modeling with the discovery of the

* Mustafa ULUKAVAK, mulukavak@gmail.com, Tel: 0462 377 3653

relationship between these parameters.

Key Words: *Total Electron Content (TEC), GPS, İonosphere, Earthquake Precursors.*

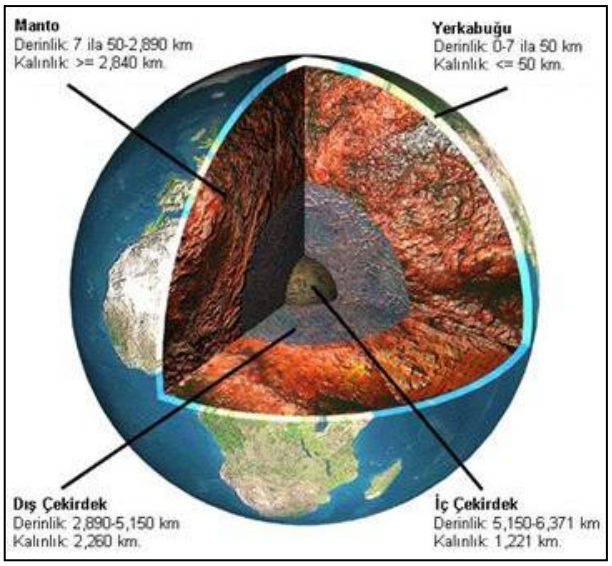
1. Giriş

Depremlerin önceden kestirilebilmesi için deprem doğasında meydana gelen değişimlerin incelenmesi gerekmektedir. Bu amaçla yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Bilim adamları insanlığın doğal afetlerden zarar görmemesi veya bu zararı en aza indirgeyebilmek adına tedbirler almakta ve bu yönde yapılan çalışmaları sürdürmektedirler. Doğal afetlerden en yıkıcısı olan depremin meydana geliş zamanını tam anlamıyla kestirebilmek şu an için mümkün olmamaktadır.

Depremlerin iyonosferde yaptığı değişimler ilk olarak 1960'lı yıllarda Barnes ve Leonard (1965) tarafından araştırılmıştır. Araştırmacılar büyük depremlerden önce herhangi bir öncül işaretin belirlenmesi için kritik frekans, F2 katmanının en üst elektron yoğunluğu ve toplam elektron içeriğini incelemişlerdir (Datchenko et al., 1972;Liu et al., 2000a, 2001b, 2004, 2006). Pulinets (1998), uydulardan kısa zamanda iyonosferik anomalilerin deprem öncesinde belirlenebileceğini belirtmiştir. Günümüzde geniş bir alanda çalışmaları süren depremlerin iyonosferik öncülleri araştırmaları yirmiden fazla ülkede devam etmektedir. İyonosferik anomalilerin tanımlanması Pulinetsand Boyarchuk 2004,Dauterman et al 2007'de ve sismik iyonosferik öncüllerin fizibilite doğrulaması Du et al 1998 tarafından devam etmektedir. Bu yönde yapılan çalışmalar sürdükçe ve elde edilen parametrelerin farklı disiplinlerin ortaklaşa çalışmalarıyla beraber değerlendirilmesiyle depremin meydana geliş zamanı hakkında faydalı bilgiler ortaya çıkacaktır. Bu çalışmada, deprem öncüllerinden TEC değişiminin nasıl belirlendiği ve depremlerin meydana gelmeden önce TEC değerlerinde ortaya çıkardıkları anomalilerin deprem öncülü olarak yorumlanabilmesi konusunda yapılmış araştırmalar incelenmiştir.

2. Deprem ve Deprem Öncülleri

Levha hareketleri sonucu levha sınırlarında oluşan kırılmalar nedeniyle ani olarak ortaya çıkan titreşimler dalgalar halinde yayılarak geçtikleri ortamları ve yer yüzeyini sarsarak depremleri oluştururlar (URL-1).Dünyanın içyapısı konusunda, jeolojik ve jeofizik çalışmalar sonucu elde edilen verilerin desteklediği bir yeryüzü modeli bulunmaktadır (Şekil-1).



Şekil 1. Yerkürenin Katmanları (URL-3).

Bu modele göre, yerkürenin dış kısmında yaklaşık 50km. kalınlığında oluşmuş bir taşküre (Litosfer) vardır. Kıtalar ve okyanuslar bu taşkürede yer alır. Litosfer ile çekirdek arasında kalan ve kalınlığı yaklaşık 2.900 km olan kuşağa Manto adı verilir. Manto'nun altında ise çok yoğun yapıdaki bir madde olan iç ve dış çekirdeğin bulunduğu kabul edilmektedir. Taşküre'nin altında Astenosfer denilen yumuşak Üst Manto bulunmaktadır. Çok sıcak olan çekirdeğin ısıttığı mantonun oluşturduğu konveksiyon akımları nedeniyle yerkabuğunda birçok levha oluşmuştur. Bu levhalar üzerinde duran kıtalar, Astenosfer üzerinde yüzmekte olup, birbirlerine göre insanların hissedemeyeceği bir hızla hareket etmektedirler. Konveksiyon akımlarının yükseldiği yerlerde levhalar birbirlerinden uzaklaşmaktadırlar. Levhaların birbirlerine değdikleri bölgelerde sürtünmeler ve sıkışmalar olmaktadır. Konveksiyon akımlarının neden olduğu bu

ardışıklı olay taşkürenin altında devam etmektedir. Yerkabuğunu oluşturan levhaların birbirine sürtündükleri, birbirlerini sıkıştırdıkları, birbirlerinin üstüne çıktıkları ya da altına girdikleri bu levhaların sınırları dünyada depremlerin oldukları yerler olarak karşımıza çıkmaktadır (Steinand Klosko, 2002). Dünyada olan depremlerin hemen büyük çoğunluğu bu levhaların birbirlerini zorladıkları levha sınırlarında dar kuşaklar üzerinde oluşmaktadır (Atabey,2000, URL-1). Bu doğa olayı ile yeryüzünde ve üzerindeki büyük mühendislik yapılarında meydana gelen maddi ve/veya manevi kayıplar, az ya da çok hasarlı durumlar ortaya çıkmaktadır.

Depremlerin ne zaman ve nerede meydana geleceği, depremin meydana geliş aşamalarındaki belirsizliklerin hala keşfedilememiş bir durum olarak görülmesinden dolayı bunun yerine bilim adamları deprem öncülerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapmaktadırlar (Wyss, 1997). Bu deprem öncülerinden birisi de iyonosferdeki TEC değişimidir (Pulinetsand Boyarchuk, 2004).

3. İyonosferdeki Toplam Elektron içeriği (TEC)

Toplam Elektron İçeriği (TEC) yerden en az 1000km. yüksekliğe kadar olan birim alandaki serbest elektron sayısıdır. TEC, GPS alıcısı ile her bir GPS uydusu arasındaki sinyal yolunda bulunan ve GPS sinyalinden elde edilen iyonosferdeki serbest elektronların göstergesi olarak da ifade edilmektedir. Bu değer genellikle taban alanı $1m^2$ olan silindirdeki toplam elektron sayısı 10^6elektron/m^2 = 1TEC birimi (TECU) olarak değerlendirilir. TEC değer aralığı 10^{16}-10^{19}el/m^2 olarak verilmiştir (Klobucharand Aarons, 1973;Dach et al, 2007;Norsuzila et al, 2010;Schaer, 1999;Wild, 1994;Komjathy, 1997).

TEC'e etki eden değişkenler coğrafi konum, yerel zaman, mevsim, aşırı ultraviyole radyasyonu değişkenliği ve manyetik aktiviteler (D_{st} indeksi) olarak sıralanabilir. En küçük TEC değeri gece yarısında ve en büyük TEC değeri öğlen saatlerinde oluşmaktadır. Gece TEC değişimi elektron ve iyonların durumlarına göre yavaştır. En büyük TEC değeri genellikle öğleden önce ve en küçük TEC değeri gün doğumundan hemen önce ortaya çıkmaktadır. Bununla beraber güneş ışınları direkt ulaştığı için TEC değişimi kuzeyden güneye doğru artmaktadır (Norsuzila et al, 2010; Schaer, 1999; Wild, 1994).

Sinyal yolundaki gecikme/hızlanma, sistemin frekansına bağlı olarak değişebilir. Ayrıca iyonosferin o anki TEC değerinin de bu gecikmeye/hızlanmaya etkisi vardır. Frekansa ve TEC değerlerine bağlı zamandaki bu gecikme/hızlanma,

$$\Delta t = \frac{40.3}{c.f^2} TE\dot{I}\ (saniye) \quad (1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada, c, ışık hızı (3.10^8m/sn); f, sistemin frekansı (Hz) ve TEC, Toplam Elektron İçeriği (el/m^2) olarak verilmiştir(Norsuzila et al, 2010).

Herhangi bir operasyonel veya potansiyel radyo dalgalarının yayılımının kullanıldığı zaman gecikmesinin ölçülmesi uygulamalarında iyonosferden geçen sinyalin gecikmesine/hızlanmasına sebep olan TEC düzeltmeleri, konum doğruluğunu artırmak için dikkate alınması gereken bir parametredir (Klobucharand Aarons, 1973).

İyonosferik TEC genellikle GPS uydularını kullanılarak taşıyıcı fazın uydudan alıcıya kadar olan gecikmelerinin karakterizasyonu ile belirlenir. GPS uyduları, konumlandırma için iki farklı frekans olan L1 (1575.42MHz) ve L2 (1227.60MHz) frekanslarındaki sinyali çift frekansı alabilen donanımlı alıcılar için gönderirler. TEC gözlemi F katmanında yapılır. Çünkü bu katmandaki serbest elektronlar GPS sinyallerini diğer katmanlara göre daha fazla etkilerler (Jin et al, 2012;Klobucharand Aarons, 1973;Pulinetsand Boyarchuk, 2004;Schaer, 1999; Wild, 1994;Komjathy, 1997).

Çift-frekanslı taşıyıcı faz ve kod gecikmesi GPS gözlemleri uydu ve alıcı arasındaki sinyal yolu oyunca iyonosferik gözlemler için kombine edilebilirler. Psoydo gözlem,

$$P_{k,j}^{i} = \rho_{0,j}^{i} + d_{ion,k,j}^{i} + d_{trop,j}^{i} + c(\tau^{i} - \tau_{j}) + d_{k}^{i} + d_{k,j} + \varepsilon_{k,j}^{i} \quad (2)$$

eşitliğinden, taşıyıcı faz ölçmeleri ise

$$L_{k,j}^{i} = \rho_{0,j}^{i} - d_{ion,k,j}^{i} + d_{trop,j}^{i} + c(\tau^{i} - \tau_{j}) - \lambda(b_{k,j}^{i} + N_{k,j}^{i}) + \varepsilon_{L,k,j}^{i} \quad (3)$$

eşitliğinden hesaplanır. Burada,*P*, GPS psoydomesafe; *L*, GPS taşıyıcı faz; *ρ*, GPS alıcısı ile uydu arasındaki gerçek mesafe; $d_{ion,}$ iyonosfer gecikmesi; $d_{trop,}$ troposfer gecikmesi; *c*, boşluktaki ışık hızı; τ^{i}, uydu saati hatası; τ_{j}, alıcı saat hatası; *d*, uydu ve alıcının kod gecikme farkları; *b*, uydu ve alıcının faz öteleme farkları; *N*, taşıyıcı dalga faz belirsizliği ve *ε*, uydu ile GPS alıcısı arasındaki sinyalin gürültüsü. *k=1,2* alt indis frekanslar için, *i* üst indis GPS uydusu için, *j* alt indis GPS alıcısı için kullanılmıştır.

Lokal TEC belirleme çalışmalarında, çift frekanslardan elde edilen psoydo mesafe gözlemleri ve taşıyıcı faz gözlemlerinde her bir uydu ve alıcı arasındaki sinyallerinin farkları alınarak,

$$P_{4} = P_{1j}^{i} - P_{2j}^{i} = \left(d_{ion,1,j}^{i} - d_{ion,2,j}^{i}\right) + DCB^{i} + DCB_{j} \quad (4)$$

$$L_{4} = L_{1j}^{i} - L_{2j}^{i} = \left(d_{ion,1,j}^{i} - d_{ion,2,j}^{i}\right) - \lambda\left(b_{1,j}^{i} - b_{2,j}^{i}\right) - \lambda\left(N_{1,j}^{i} - N_{2,j}^{i}\right) \quad (5)$$

eşitlikleri elde edilir. Burada, $DCB^{i} = d_{1}^{i} - d_{2}^{i}$ ve $DCB_{j} = d_{1,j} - d_{2,j}$ uydu ve alıcılar için diferansiyel kod farklarıdır. P_{4}psoydo mesafe gözlemleri çok fazla gürültüye sahip olduklarından taşıyıcı faz gözlemleri kullanılarak yumuşatılırlar. Yumuşatılmış $P_{4,sm}$ gözlemleri,

$$P_{4,sm} = w_{t}P_{4}(t) + (1 - w_{t})P_{4,prd} \quad (t > 1) \quad (6)$$

eşitliği ile gösterilir. Burada,*t,* epok numarası; w_{t}, *t* epoğuna bağlı ağırlık faktörü ve $P_{4,prd}$ yumuşatma elemanıdır. (6) eşitliğindeki yumuşatma elemanı

$$P_{4,prd} = P_{4,sm}(t-1) + [L_{4}(t) - L_{4}(t-1)] \quad (t > 1) \quad (7)$$

Olarak hesaplanır. Bu eşitlikte *t=1* alındığında bir gözlem yayının birinci epoğu$P_{4,sm}$, P_{4}'e eşit olur. Böylece, psoydo mesafe gözlemlerini yumuşatmadan önce faz kaymalarının ve kaba hataların taşıyıcı faz gözlemlerinden elimine edilmiş olur.

GPS psoydo mesafe ve faz ölçülerindeki iyonosfer gecikmesi,

$$d_{ion} = \frac{40.3}{f^{2}} STEC \quad (8)$$

eşitliğinden elde edilir. Burada, *f*, taşıyıcının frekansı ve STEC eğik sinyal yolundaki toplam elektron içeriğini göstermektedir. (8) eşitliği (4) eşitliğinden çıkarılır ve P_{4} yerine yumuşatılmış $P_{4,sm}$ gözlemleri koyulursa,

$$P_{4,sm} = 40.3\left(\frac{1}{f_{1}^{2}} - \frac{1}{f_{2}^{2}}\right) STEC + DCB^{i} + DCB_{j} \quad (9)$$

eşitliği elde edilir. Yumuşatma işleminden sonra daha güvenilir DCB kestirimi değerleri bulunabilir. (9) eşitliğinden *STEC* değeri, zaman biriminde olan DCB değerleri *c* ışık hızı ile çarpılıp mesafeye dönüştürülerek,

$$STEC = -\frac{f_{1}^{2} f_{2}^{2}}{40.3(f_{1}^{2} - f_{2}^{2})} (P_{4,sm} - cDCB^{i} - cDCB_{j}) \quad (10)$$

belirlenir. İyonosfer tabakasının yerden 60-1000kmyükseklikleri arasında bulunduğu bilinmektedir. İyonosferde H yüksekliğindeki ince bir tabakada tüm elektronların bulunduğu varsayılmaktadır. *STEC* modifiye edilmiş tek tabaka modeli haritalama fonksiyonu ile düşey toplam elektron içeriğine *(VTEC)*

$$VTEC = MF(z)STEC$$
$$MF = \cos\left(\arcsin\left(\frac{R}{R+H}\sin(\alpha z)\right)\right) \quad (11)$$

eşitliklerinden dönüştürülür (URL-2).Burada, *z*, her bir uydunun yükselim açısını; R, dünyanın yarıçapını; H, iyonosferdeki ince tabaka kabulünün belirleneceği yüksekliğini göstermektedir. $\alpha = 0.978$ olarak CODE iyonosferik çalışma grubu tarafından belirlenmiştir.

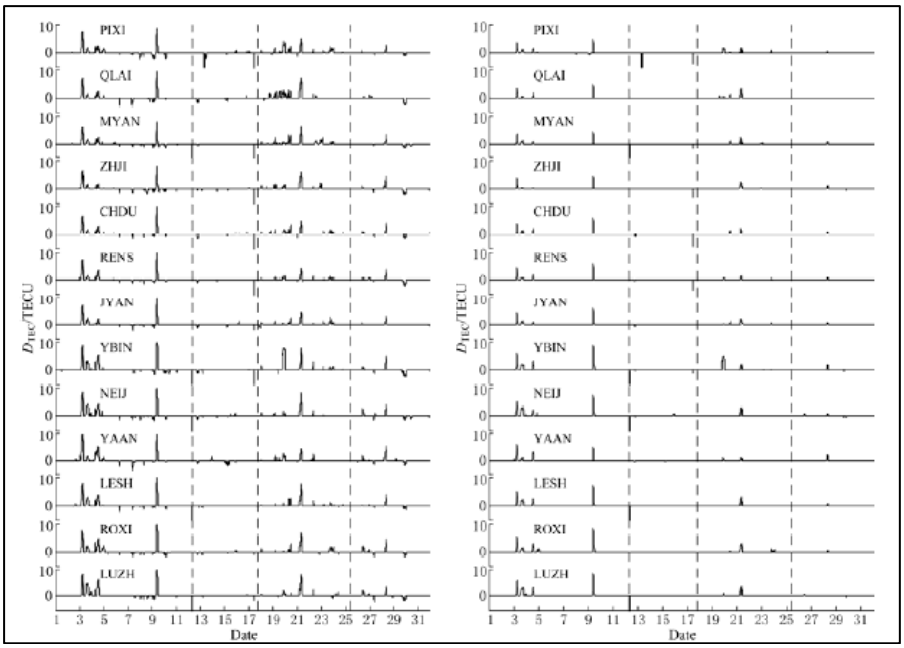
İyonosferik küresel harmonik fonksiyonlar uygulanarak ilgili enlem ve boylamdaki VTEC değeri *E(β,s)*,

$$E(\beta, s) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^{n} \widetilde{P_{nm}}(sin\beta)(a_{nm}\cos(ms) + b_{nm}\sin(ms)) \quad (12)$$

Eşitliğinden belirlenir (Schaer, 1999).Burada,*β*,iyonosferin delindiği noktanın jeosantrik enlemi; $s = \lambda - \lambda_0$ güneş sabit boylam değeri;a_{nm} ve b_{nm}iyonosferik modelin katsayıları;Λ Normalleştirme fonksiyonu ve P_{nm} normalleştirilmemiş Legendre Polinomu olmak üzere $\widetilde{P_{nm}} = \Lambda(n,m)P_{nm}$ normalleştirilmiş LegendrePolinomlarıdır. İlgili enlem ve boylamdaki a_{nm} ve b_{nm} katsayıları elde edildikten sonra (12) eşitliğinde yerine yazılarak bu enlem ve boylamdaki TEC değerleri elde edilir (Jin et al, 2012).

4. TEC Değişimi ve DepremİlişkisiAraştırmaları

Son yıllarda, deprem öncesi iyonosferde meydana gelen değişimler ve TEC değişimi ile depremler arasındaki ilişki hakkında çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan, Liu et al (2009)'da 12 Mayıs 2008tarihindeÇin'dekiWenchuan depreminden (Ms=8.0) önce meydana gelen iyonosferik anomalileri araştırmış ve deprem merkezinin etrafındaki 13 GPS istasyonunun gözlemlerinden iyonosferik TEC değerleri hesaplanarak Neymen-Pearson sinyal tespit yöntemi ile TEC anomalilerinin olasılık değerleri belirlenmiştir (Şekil 2).

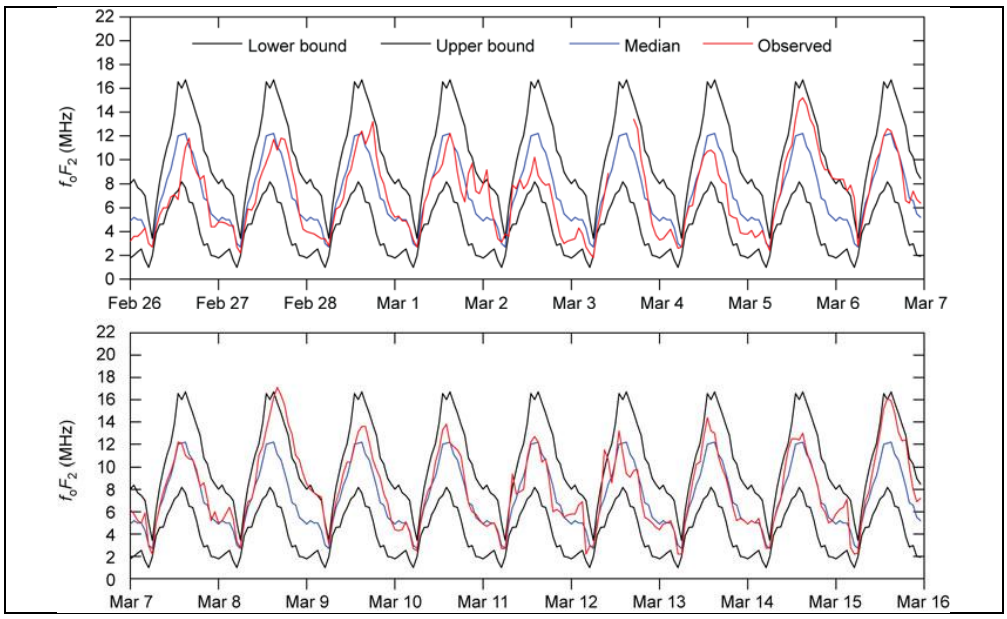


Şekil 2. 2008 yılı Mayıs ayına ait TEC farkları *(D_{TEC})* ve standart sapması 2 birim sınırlandırılmış TEC farkları (Liu et al., 2009)

Şekil 2'de düşey kesikli çizgiler depremin meydana geldiği zamanı göstermektedir. Görüldüğü üzere depremin oluştuğu 12 Mayıs'tan bir hafta önce depremin merkez üssünün üzerindeki iyonosferik TEC değerleri anormal şekilde dağılım göstermiştir. Çoğunluğu pozitif olan bu dağılımların en

büyük değeri sismik olaydan üç gün önce 9 Mayıs'ta belirlenmiştir (Liu et al., 2009).

Literatürde GPS-TEC yönteminin yanı sırakısa dalga radyo sinyali izlemesi yapılan ve iyonosfer radarı denilen iyonosondalardan elde edilen iyonosfer gözlemleri ile deprem öncesi iyonosferdeki değişimlerin incelenmesi de yapılmaktadır. Yao et al 2011'de, 11 Mart 2011 tarihinde Japonya'nın doğu kıyısındaki Honshu bölgesinde meydana gelen Mw=9.0 büyüklüğündeki deprem öncesinde araştırmalar yapmışlardır. Çalışmada depremin merkez üssüne yakın GNSS ve iyonosonda istasyonları verileri kullanılarak deprem anı öncesinde iyonosferde meydana gelen anomaliler ortaya çıkarılmıştır. Çalışmada iyonosonda verilerinden elde edilen anomalileri çizilmiş ve örnek olarak Okinawa/Ogimi iyonosonda istasyonundaki zaman serisi verilmiştir (Şekil 3).



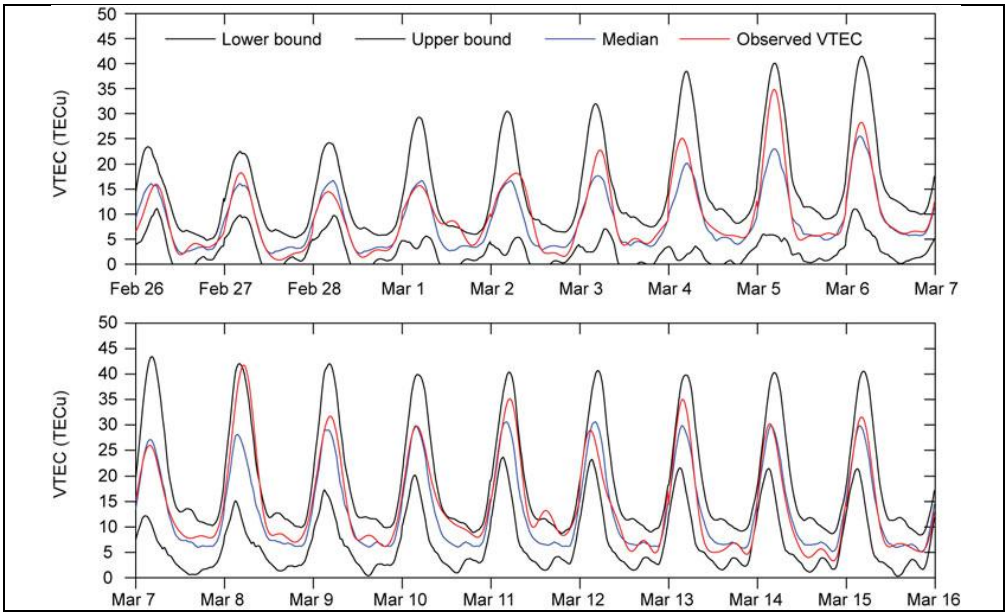
Şekil 3. 26 Şubat -15 Mart 2011 tarihleri arasındaki Okinawa/Ogimiiyonosonda istasyonundaki *foF2* zaman serileri (Yao et al., 2011)

Şekil 3 incelendiğinde, gözlemlenen iyonosonda verilerinde ortaya çıkan anomalilerin(kırmızı renkli grafik)en büyük değerinin depremden (11 Mart) üç gün önce 8 Mart 2011 tarihinin son 6 saatinde olduğu görülmüştür. Yao et al 2011'deayrıca GPS verilerinden de iyonosferdeki anomaliler belirlenmiştir. GPS sinyallerini güneş ve manyetik fırtınalar olumsuz etkilediğinden bu etkiler elimine edildikten sonra iyonosferik anomaliler belirlenmiş ve örnek olarak AIRA IGS istasyonuna ait VTEC zaman serisi verilmiştir (Şekil 4).

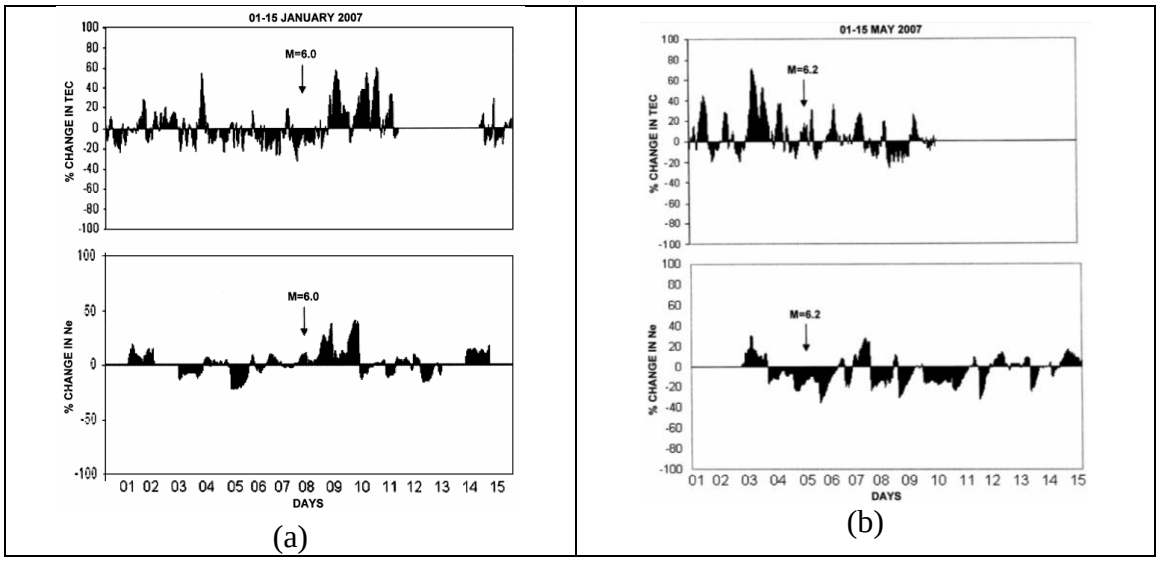
Şekil 4'te görüldüğü gibi yine en büyük anomali8 Mart'ta belirlenmiştir. En üst seviyede tespit edilen anomali yerel zamana göre 15:00-19:00 arasında maksimuma ulaşmıştır. Çalışmada Şekil 3 ve Şekil 4 dikkate alınarak 8 Mart 2011 tarihinde elde edilen iyonosferik TEC anomalisi 11 Mart 2011 tarihindeki Japonya Depremi'nin iyonosferik öncülü olarak önerilmiştir (Yao et al., 2011).Yao et al 2011'de, iyonosondalardan elde edilen iyonosferik anomalilerin değişimleri gözlemlenmiştir ve GPS-TEC değişimleri ile yapılan çalışmaları destekleyici nitelikte sonuçlar verebileceği ortaya çıkarılmıştır.

Sadece deprem kaynaklı TEC değişiminin incelenmesinde iyonosferi etkileyen diğer etkilerin göz ardı edilmesi yanıltıcı sonuçlar doğurabilir. TEC değişimi depremlerin yanı sıra güneşteki patlamalara göre de değişmektedir. Güneş patlamaları iyonosferin belli bölgelerinde elektron yoğunluğu (Ne) değişimini artırmakta yada azaltmaktadır. Bu nedenle de elektron yoğunluğu (Ne) değişimi değerlendirme

aşamasında dikkate alınması gereken parametrelerden biridir. Singh et al 2010'da DEMETER uydusundan alınan elektron yoğunluğu verileri ve GPS-TEC değişimleri beraber değerlendirilmiştir. Bu araştırmada, 8 Ocak 2007 ve 5 Mayıs 2007 tarihinde Hindistan'da meydana gelen M=6 ve M=6.2büyüklüğündeki depremlerin, merkez üslerinin 1587km ve 887km uzağındaki Agragözlem istasyonuna olan etkileri incelenmiştir. Depremlerin oluş zamanlarını içine alan 1 Aralık 2006 ve 30 Haziran 2007 tarihleri arasındaki yedi ay boyunca GPS-TEC ve Ne değişimleri değerlendirilmiştir (Şekil 5).



Şekil 4. 26 Şubat 15 Mart 2011 tarihleri arasındaki AIRA IGS istasyonu üzerindeki VTEC zaman serisi(Yao et al., 2011).

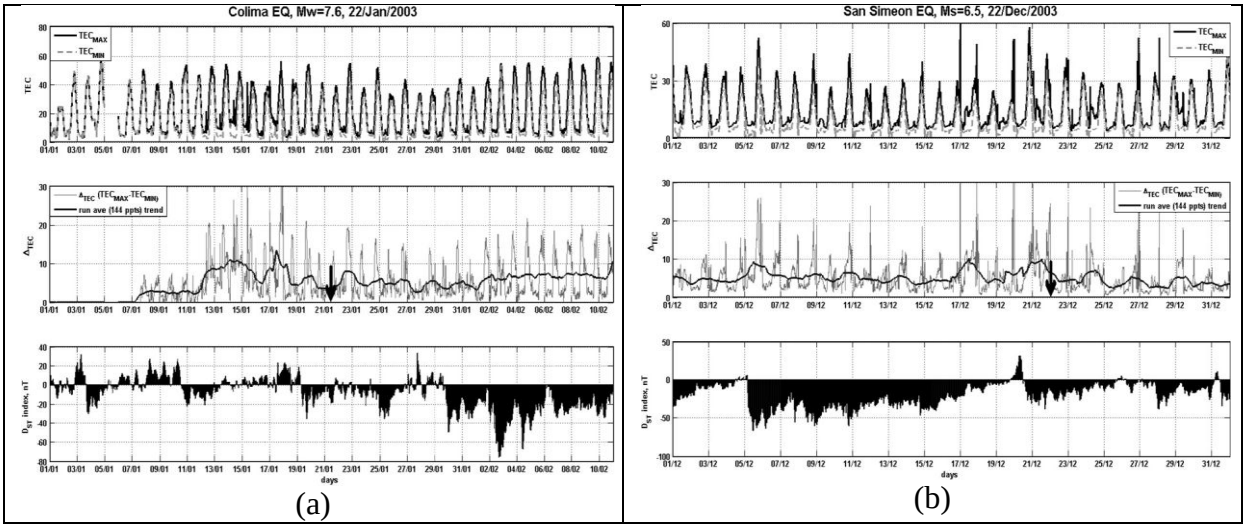


Şekil 5. Agra GPS istasyonunun Ocak2007 (a) ve Mayıs 2007 (b) aylarına ait TEC değişimleri ve DEMETER uydusu verilerinden elde edilen Ne değişimleri (Singh el al 2010).

Şekil 5'te görüldüğü gibi TEC ve Ne değişimleri depremden 1-4 gün önce ve 1-2 gün sonra aylık ortalama değerlerinin %40-80 arasında farklı değerler göstermiştir. Gözlemlenen değişimler, iyonosfer ve yarı-nötr iyon kümelerinin

elektriksel alanlardan etkilendiğini göstermiştir (Singh el al., 2010).

İyonosferdeki değişiklik sadece tek bir istasyondan elde edilen TEC değerlerinin istatistiksel analizi ile değil,yakın GPS alıcılarının kayıtlarının da beraber değerlendirilmesi ile üretilen TEC değerleri ve aralarındaki korelasyonlarla birlikte değerlendirilmesi gerekir. Pulinets et al 2007'de depremlerin önceden belirlenmesi için yeni bir değerlendirme yöntemi olarak lokal iyonosfer değişkenliği yöntemini önermiştir. Bu araştırmada22 Ocak 2003 tarihinde Meksika'da gerçekleşen Mw=7.6 Colima Depremi ve 22 Aralık 2003 tarihinde Kaliforniya'da gerçekleşen Ms=6.5 San Simeon Depremi incelenmiş ve depremlerin oluştuğu bölgelerdeki GPS istasyonlarından elde edilen verilerle lokaliyonosfer değişkenliği yöntemi ile iyonosferik TEC değişimleri araştırılmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. (a) 22 Ocak 2003 Mw=7.6Colima Depremi, (b) 22 Aralık2003Ms=6.5San Simeon Depremi TEC ve D_{st} indeksi değişimleri (Pulinets et al 2007)

Şekil 6'da ilk satırdaki grafikler GPS istasyonlardan elde edilen maksimum ve minimum TEC değişimini, ikinci satırdaki grafikler deprem gününün öncesinde ve sonrasında bölgedeki TEC değişkenliğinin indeksini, son satırdaki grafikler 2003 yılının Ocak ve Aralık aylarına ait D_{st} indeksini göstermektedir. Şekil 6'da görüldüğü gibi depremler 5-10 gün öncesinden iyonosferdeki değişkenliği artırmakta ve deprem olduktan sonra bu durum normal haline dönmektedir (Pulinets et al 2007).

5. Sonuçlar

Yıkıcı etkileri büyük, doğal afetlerden biri olan depremin maddi ve manevi kayıplarını en aza indirebilmek için yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Depremin meydana gelme zamanının kesin olarak belirlenebilmesi günümüz teknolojisinde mümkün olmadığı için deprem öncesinde meydana gelen değişimlerden faydalanılarak depremin meydana gelme zamanının tahminini yapma çalışmalarına ağırlık verilmektedir. Günümüzde depremlerin meydana gelmesinden önce ortaya çıkan İyonosferdeki Toplam Elektron İçeriği (TEC) değişimlerine bağlı olarak depremlerin önceden kestirilmesi üzerine birçok araştırma yapılmaktadır. Araştırmaların çoğu deprem olduktan sonra, depremin meydana geldiği bölgede bulunan GPS istasyonlarından elde edilen verilerin değerlendirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Değerlendirmeler genellikle gün içindeki TEC değişimlerinin saatlik olarak elde edilmesinin ardından bazı istatistiksel yöntemler kullanılarak bu değerlerdeki ani değişimler deprem öncülü olarak gösterilmiştir. Ayrıca TEC değişimlerini etkileyen deprem haricindeki etkiler (güneş patlamaları, manyetik aktiviteler vs.) incelenip serilerden elimine edildikten sonra daha güvenilir TEC

değişimlerinin elde edileceği görülmüştür. Magnitüdü 6'dan büyük depremler için yapılan araştırmalarda genelde depremin 1-5 gün öncesindeki TEC anomalilerinin ani değişim gösterdiği zaman serilerinde görülmüştür. Bu bağlamda, özellikle magnitüdü 6'dan büyük depremler için iyonosferdeki TEC değişimlerinin deprem öncülü olabileceği söylenebilir. Deprem öncülleri, teknolojik gelişmelere ve farklı disiplinlerle ortaklaşa yapılacak çalışmalara bağlı olarak daha güvenilir ve gerçekçi olarak elde edilebilecektir.

Kaynaklar

Atabey, E., (2000), *"Deprem"*, Maden Tetkik Ve Arama Genel Müdürlüğü Yayınları, Eğitim Serisi No. 34, Ankara, 2000.

Barnes R A andLeonard R S (1965),Observations of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake. *J GeophysRes*70: 1 250−1 253.

Bibl, K., (1998), Evolution of the Ionosonde, *AnnaliDi Geofisica*, Vol. 41, N. 5-6, November-December 1998.

Dach, R.,Hugentobler, U., Fridez, P. &Meindl, M. (2007). *Manual of Bernese GPS Software Version5.0*, Astronomical Institute, University of Bern.

Datchenko E A, Ulomov V I and Chernyshova C P (1972). Electron density anomalies as the possible precursor of Tashkent earthquake. *DoklUzbekAcadSci*12: 30−32.

Dautermann T, Calais E, Haase J and Garrison J (2007). Investigation of ionospheric electron content variations before earthquakes in southern California, 2003–2004. *J GeophysRes*12: 1 230−1 231.

Du P R, Jiang H R andGuo Q S (1998). Research on possibility of ionospheric anomalies as an earthquake precursor. *Earthquake*18(2): 119−126 (in Chinesewith English abstract).

Jin, R., S.G. Jinand G.P. Feng (2012), M_DCB: Matlabcode forestimating GNSS satellite and receiver differential code biases, *GPS Solut*., 16(4), 541-548, doi: 10.1007/s10291-012-0279-3.

Klobuchar, J.A. and Aarons, J.,(1973), *"Introduction - Importance of the Total Electron Content Parameter"*, Total Electron Content Studies Of The Ionosphere, Air Force Cambridge Research Laboratories L. G. Hanscom Field, Massachusetts, Received for publication7 February1973.

Komjathy, A. (1997). Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System, Ph.D. dissertation, *Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report* NO. 188, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 248pp.

Liu J Y, Chen Y I, Pulinets S A and Chuo Y J (2000a). Seismo-ionospheric signatures prior to *M*>6.0Taiwan earthquakes. *GeophysResLett*27(19): 3 113−3 116.

Liu J Y, Chuo Y J and Chen Y I (2001b). Ionospheric GPS TEC perturbations priorto the 20 September 1999, Chi-Chi earthquake. *Geophys ResLett*28: 1 383−1 386.

Liu J Y, Chuo Y J, Shan S J, Tsai Y B, Chen Y I, Pulinets S A andYu S B (2004). Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements. *AnnalesGeophysicae*22: 1 585−1 593.

Liu J Y, Chen Y I, Chuo Y J and Chen C S (2006). A statistical investigation of pre-earthquake ionospheric anomaly. *J Geophys Res*111: A05304, doi:10.1029/2005JA011333.

NorsuzilaYa'acob, Mardina Abdullah and MahamodIsmail (2010). GPS Total Electron Content (TEC) Prediction at

Ionosphere Layer over the Equatorial Region, *Trends in Telecommunications Technologies*, Christos J Bouras (Ed.), ISBN:978-953-307-072-8, InTech.DOI:10.5772/8474. Availablefrom:http://www.intechopen.com/books/trends-in-telecommunications-technologies/gps-total-electron-content-tec-prediction-at-ionosphere-layer-over-the-equatorial-region

Pulinets S A (1998). Strong earthquakes prediction possibility with the help of top side sounding from satellites. *Advances in Space Research*21(3): 455−458.

PulinetsS. A. And BoyarchukK. A. (2004), *"Ionospheric Precursors of Earthquakes"*, Springer, New York, NY, USA, 2004.

Pulinets S., Kotsarenko, A.N., Ciraolo, L., Pulinets, I.A. (2007) Special case of ionospheric day today variability associated with earthquake preparation, *Adv. Space Res*., 39, 970-977, 2007.

Schaer, S. (1999): 'Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System', *Geodatisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, Vol. 59, 1999.

Singh, V.,Chauhan V., Singh O.P., and Singh B. (2010), Ionospheric effect of earthquakes as determined from ground based TEC measurement and satellite data, *Indian J. of Radio& Space Phys*., 39, 63-70, 2010.

Stein, S., Klosko, E., (2002), Earthquake Mechanisms And Plate Tectonics, *International Handbook of Earthquake And Engineering Seismology*, Volume 81A: 69-78, ISBN: 0-12-440652-1.

Wild, U. (1994): 'Ionosphere and Geodetic Satellite Systems: Permanent GPS Tracking Data for Modeling and Monitoring', *Geodatisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, Vol. 48.

Wyss M., (1997), Second Round of Evaluations of Proposed Earthquake Precursors, *Pure and Applied Geophysics*,149, 1997, 3-16.

Yao, Y. B.,Chen, P., Wu, H., Zhang, S., and Peng, W. F. (2012), Analysis of ionospheric anomalies before the 2011 M-w 9.0 Japan earthquake, *Chinese Sci. Bull*., 57, 500–510, 2012a.

URL-1:T.C. Başbakanlık Afet Ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı Deprem Dairesi Başkanlığı http://www.deprem.gov.tr/sarbis/Deprem/Depremnedir.aspx (Erişim Tarihi: 16 Ağustos 2013)

URL-2: Global Ionosphere Map Proccessing Description Web Site http://aiuws.unibe.ch/spec/ion.php#processing_description (Erişim Tarihi: 18 Eylül 2013)

URL-3: Yerkürenin katmanları görseli (Şekil 1) http://www.korhaber.com/yazar/DUNYAMIZI-NE-KADAR-TANIYOR-VE-NE-KADAR-KORUYORUZ/183 (Erişim Tarihi: 16 Ağustos 2013)