Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi
Cilt: 6, No: 3, 2014 (10-21)

Electronic Journal of Map Technologies
Vol: 6, No: 3, 2014 (10-21)

TEKNOLOJİK ARAŞTIRMALAR

www.teknolojikarastirmalar.com
e-ISSN: 1309-3983

Makale
(Article)

Deprem Kaynaklı Toplam Elektron İçeriği Değişimlerinin Araştırılması: Ege Denizi Depremi (24.05.2014 Mw:6.5)

Mustafa ULUKAVAK*, Mualla YALÇINKAYA*
*Karadeniz Teknik Üniversitesi Müh. Fak. Harita Müh. Böl. 61080 Trabzon/TÜRKİYE
mulukavak@gmail.com

Özet

Uydu ve uzay tekniklerinin gelişmesiyle GNSS uyduları birer sensor gibi kullanılmaya başlanmıştır. GNSS gözlemleri ile iyonosferdeki Toplam Elektron İçeriği (TEC) değişimleri deprem öncesi, deprem anı ve deprem sonrası belirlenebilmektedir. Böylece depremlerin TEC değişimlerine etkileri izlenebilmektedir. Bu amaçla çalışmada, Çanakkale açıklarında 24 Mayıs 2014 tarihinde, saat 12:25:03'te (-3 UT) meydana gelen Ege Denizi Depremi'nin (6.5 Mw) iyonosferde meydana getirdiği değişimler araştırılmıştır. Deprem öncesi, deprem anı ve deprem sonrası TEC değişimleri iki kampanyada araştırılmıştır. Birinci kampanyada AYVL, IPSA ve YENC istasyonlarının 115. ve 156. GPS günü arası toplam 42 günlük VTEC değişimleri belirlenmiş ve deprem öncesinde ortaya çıkan iyonosferik TEC değişimlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. İkinci kampanyada ise AYVL, CANA ve IPSA istasyonlarının 144. GPS gününde üç GPS uydusuna ait (GPS05, GPS08 ve GPS15) STEC değerleri deprem anında meydana gelen iyonosferik TEC değişimlerinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu çalışmada, jeomanyetik aktivitenin TEC değişimlerine etkisini incelemek için deprem öncesi ve sonrasını içeren jeomanyetik aktivite (Dst) değerleri incelenmiş. deprem öncesinde ve sonrasında jeomanyetik aktivitenin olmadığı belirlenmiştir. Bu bağlamda, depremin meydana geldiği bu bölgede deprem öncesi VTEC değişimlerinin deprem gününden yaklaşık 1-2 gün öncesinde ortaya çıktığı, yapılan diğer çalışma sonucunda ise kısa periyotlu değişimlerin STEC değerlerine deprem anından yaklaşık 4 ile 7 dakika sonra etki ettiği görülmüştür.
Anahtar Kelimeler: GPS, Deprem, İyonosfer, TEC, Zaman Serisi Analizi.

Investigation Of Total Electron Content Variations Due To Earthquakes: Aegean Sea Earthquake (24.05.2014 Mw:6.5)

Abstract

GNSS satellites have been used as sensors with the development in space and satellite techniques. TEC variations in the ionosphere before, during and after the earthquake can be identified by means of GNSS observations. Thus, the effects of earthquakes over TEC variations can be monitored. For this purpose, the effects of the Aegean Sea earthquake (6.5 Mw), which is occured off Çanakkale in 24 May 2014 at 12:25:03 (-3 UT), are investigated. Pre-seismic and co-seismic TEC variations are examined in two campaigns. In the first campaign, 42-day (between DoY 115th and 156th) VTEC variations of the AYVL, IPSA and YENC stations are determined and used to monitor the ionospheric TEC variations before the earthquake. In the second campaign, the STEC data, which is calculated using three GPS satellite (GPS05, GPS08 and GPS15) observations from the AYVL, CANA and IPSA stations at DoY 144, is used to detect the ionospheric TEC variations at the time of the earthquake. In this study, 42-day Dst variation values, for before and after the earthquake, are examined in order to investigate the effects of the geomagnetic activity over TEC variations. As a result, has been concluded that no geomagnetic activity occured before and after the earthquake. In this context, VTEC anomalies before the earthquake are found to occur approximately 1-2 days before the earthquake. It is also found out that the short period variations affects the STEC values approximately 4-7 minutes after the earthquake.

Keywords: GPS, Earthquake, Ionosphere, TEC, Time Series Analysis.

Bu makaleye atıf yapmak için
Ulukavak, M., Yalçınkaya, M. "Deprem Kaynaklı Toplam Elektron İçeriği Değişimlerinin Araştırılması: Ege Denizi Depremi (24.05.2014 Mw:6.5)" Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi 2014, 6(3) 10-21

How to cite this article
Ulukavak, M., Yalçınkaya, M. "Investigation Of Total Electron Content Variations Due To Earthquakes: Aegean Sea Earthquake (24.05.2014 Mw:6.5)" Electronic Journal of Map Technologies, 2014, 6(3) 10-21

1. GİRİŞ

Teknoloji alanında yapılan yenilikler ilerledikçe kullanım amaçlarına göre uygulama alanları da değişebilmektedir. Hassas konum belirlemede kullanılan GNSS uyduları aynı zamanda dünyanın etrafında dolaşan birer sensor gibi kullanılarak deprem öncesi, deprem anı ve deprem sonrası iyonosferik değişimlerin izlenmesinde de kullanılabilmektedir.

Depremlerin ne zaman ve nerede meydana geleceği, depremin meydana geliş aşamalarındaki belirsizliklerinden dolayı hala tam olarak keşfedilebilmiş değildir. Bunun yerine bilim adamları deprem öncülerinin belirlenmesi üzerine çalışmalar yapmaktadır [1]. Bu deprem öncülerinden birisi de iyonosferdeki TEC değişimi olarak önerilmiştir [2]. Bu amaçla yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Depremlerin iyonosferde yaptığı değişimler ilk olarak 1960'lı yıllarda araştırılmıştır [3]. Araştırmacılar büyük depremlerden önce herhangi bir öncül işaretin belirlenmesi için kritik frekansı, F2 katmanındaki en üst elektron yoğunluğunu ve toplam elektron içeriğini incelemişlerdir [2, 4, 5, 6, 7]. Bazı çalışmalarda uydulardan kısa zamanda iyonosferik anormalliklerin deprem öncesinde belirlenebileceği gösterilmiştir [8].

Günümüzde deprem öncülü olarak iyonosferik değişimleri yirmiden fazla ülkede araştırılmaktadır. İyonosferik anormalliklerin tanımlanması ve sismo-iyonosferik öncüllerin fizibilitesi çalışmaları devam etmektedir [2, 9, 10].

Deprem kaynaklı TEC değişiminin incelenmesinde iyonosferi etkileyen diğer etkilerin göz ardı edilmesi yanıltıcı sonuçlara sebep olabilir. TEC değişimi depremlerin yanı sıra güneşte meydana gelen patlamalardan da etkilenmektedir. Güneş patlamaları iyonosferin belli bölgelerinde elektron yoğunluğu (Ne) değişimini artırmakta ya da azaltmaktadır. Bu nedenle de elektron yoğunluğu (Ne) değişimi değerlendirme aşamasında dikkate alınması gereken parametrelerden biridir. DEMETER uydusundan alınan elektron yoğunluğu verileri ve GPS-TEC değişimleri beraber değerlendirilmiştir. 8 Ocak 2007 ve 5 Mayıs 2007 tarihinde Hindistan'da meydana gelen M=6 ve M=6.2 büyüklüğündeki depremlerin, merkez üslerinin 1587km ve 887km uzağındaki Agra gözlem 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. TEC ve Ne değişimleri depremden 1-4 gün önce ve 1-2 gün sonra aylık ortalama değerlerinin %40-80 arasında değişen farklılıklar göstermiştir [11].

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 korelasyonlar ile birlikte değerlendirilmesi gerekir. Depremlerin önceden belirlenmesi çalışmalarında lokal iyonosfer değişkenliği yöntemi önerilmiştir. Bu araştırmada 22 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 lokal iyonosfer değişkenliği yöntemi ile iyonosferik TEC değişimleri araştırılmıştır [12].

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. 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, Çanakkale açıklarında 24 Mayıs 2014 tarihinde, saat 12:25:03'te (-3 UT) meydana gelen Ege Denizi Depremi'nin (6.5 Mw) iyonosferde meydana getirdiği değişimler araştırılmıştır. Öncelikle deprem öncesi ve sonrası iyonosfer değişimine etki edebilecek jeomanyetik aktiviteler (Dst)

incelenmiştir. Daha sonra bölgedeki TUSAGA-Aktif noktalarının verileriyle STEC ve VTEC değerleri incelenerek depremin iyonosferdeki TEC değişimlerine etkisi araştırılmıştır.

2. ÇİFT FREKANSLI GPS SİNYALLERİ İLE TEC MODELLEME

2.1. Çift Frekans GPS Sinyal Modeli

GPS alıcıları, GPS uydularından gelen sinyalleri özel bir kayıt formatı olan RINEX formatında kayıt ederler. Psoydo-range kayıtlarının iki farklı frekans olan $f_1 = 1575.42$ MHz ve $f_2 = 1227.60$ MHz'ye göre genel modeli,

$$P_{1,u}^m = \rho_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + d_{trop,u}^m + d_{ion1,u}^m + c(\varepsilon_1^m + \varepsilon_{1,u}) \quad (1)$$

$$P_{2,u}^m = \rho_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + d_{trop,u}^m + d_{ion2,u}^m + c(\varepsilon_2^m + \varepsilon_{2,u}) \quad (2)$$

biçimindedir. Burada, P , psoydo-range gözlemini; ρ, uydu ve alıcı arasındaki mesafeyi, δt_u ve δt^m , alıcı ve uydu arasındaki saat hatalarını, d_{trop} ve d_{ion} , troposferik ve iyonosferik kod gecikmeleri, ε^m ve ε_u , frekansa bağlı uydu ve alıcı farklarını; c, boşluktaki ışık hızını; u, alıcı indisini ve m, uydu indisini göstermektedir [13-14]. Pseudo-range ölçüleri için, geometriden bağımsız doğrusal kombinasyon, uydu ve alıcı arasındaki mesafe (ρ) ve troposferik (d_{trop}) gecikmeleri elimine eder. Geometriden bağımsız doğrusal kombinasyon, eşitlik (1)'den eşitlik (2) çıkarılarak,

$$P_{4,u}^m = P_{1,u}^m - P_{2,u}^m = d_{ion1,u}^m - d_{ion2,u}^m + c(\varepsilon_1^m - \varepsilon_2^m) + c(\varepsilon_{1,u} - \varepsilon_{2,u}) \quad (3)$$

elde edilir. Frekansa bağlı uydu ve alıcı farkları diferansiyel kod farkları (DCBs) olarak,

$$DCB^m = \varepsilon_1^m - \varepsilon_2^m \quad (4)$$

$$DCB_u = \varepsilon_{1,u} - \varepsilon_{2,u} \quad (5)$$

tanımlanmaktadır. Burada, DCB^m uydu ve DCB_u alıcı için diferansiyel kod farklarıdır. Aynı eşitlikler faz gecikme gözlemleri için,

$$L_{1,u}^m = \lambda_1 \Phi_{1,u}^m = \rho_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + \lambda_1 \Phi_{ion1,u}^m + \lambda_1 \Phi_{trop,u}^m - c\left(\varepsilon_1^m + \varepsilon_{1,u}\right) + \lambda_1 \mathrm{N}_1^m \quad (6)$$

$$L_{2,u}^m = \lambda_2 \Phi_{2,u}^m = \rho_u^m + c(\delta t_u - \delta t^m) + \lambda_2 \Phi_{ion2,u}^m + \lambda_2 \Phi_{trop,u}^m - c\left(\varepsilon_2^m + \varepsilon_{2,u}\right) + \lambda_2 \mathrm{N}_2^m \quad (7)$$

olarak yazılır. Burada, λ_1 ve λ_2, dalga boylarını; $\Phi_{1,u}^m$ ve $\Phi_{2,u}^m$, kaydedilen faz gecikmelerini; $\Phi_{ion1,u}^m$ ve $\Phi_{ion2,u}^m$, iyonosferik faz gecikmelerini; N_1^m ve N_2^m, ilk faz belirsizliklerini; $\Phi_{trop,u}^m$, troposferik faz gecikmelerini göstermektedir. Faz ölçüleri için geometriden bağımsız doğrusal kombinasyon eşitlik (6)'dan eşitlik (7) çıkarılarak;

$$L_{4,u}^m = \lambda_1 \Phi_{1,u}^m - \lambda_2 \Phi_{2,u}^m = \lambda_1 \Phi_{ion1,u}^m - \lambda_2 \Phi_{ion2,u}^m - c(DCB^m + DCB_u) + \Delta N^m \quad (8)$$

elde edilir. Burada ΔN^m;

$$\Delta N^m = \lambda_1 \mathrm{N}_1^m - \lambda_2 \mathrm{N}_2^m \quad (9)$$

olarak tanımlanır.
İyonosferik kod ve faz gecikmeleri arasında,

$$d_{ion,u}^{m} = -\Phi_{ion,u}^{m}\frac{c}{f} \approx A\frac{STEC_u^m}{f^2} \tag{10}$$

biçimindeki yaklaşım kullanılabilir. Burada, $A = 40.3\, m^3/s^2$ ve $STEC_u^m$, alıcı u ve m uyduları arasındaki sinyal yolu boyunca olan Eğik Toplam Elektron İçeriğini gösterir. Eşitlik (3)'teki $d_{ion,u}^{m}$ ve eşitlik (8)'deki $-\Phi_{ion,u}^{m}\frac{c}{f}$ değerleri yerine eşitlik (10)'daki $A\frac{STEC_u^m}{f^2}$ yazılarak geometriden bağımsız doğrusal kombinasyon kod ve faz gözlemleri,

$$P_{4,u}^{m} = A\left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2}\right)STEC_u^m - c(DCB^m + DCB_u) \tag{11}$$

$$L_{4,u}^{m} = A\left(\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2}\right)STEC_u^m - c(DCB^m + DCB_u) + \Delta N^m \tag{12}$$

elde edilmiş olur [13-17].

2.2. STEC Belirleme Yöntemi

Eğik Toplam Elektron İçeriği (STEC) belirlenirken diferansiyel kod farklarının mutlaka bilinmesi gereklidir. f_1 ve f_2 frekanslarındaki sinyaller uydu veya alıcı donanımlarında farklı yollardan iletilirler. Bu yüzden, DCB'ler f_1 ve f_2 frekanslarındaki sinyaller için uydu ve alıcı donanımlarına bağlı olarak farklı değerler alırlar [16]. Ancak TEC hesaplama çalışmalarında bu farkların nasıl kullanılacağını gösteren herhangi standart bir prosedür yoktur [16, 18, 19]. *Kod ölçüleri* ile STEC belirleme çalışmalarında en çok;

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A}\left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\right)\left[P_{4,u}^{m}(n) + c(DCB^m + DCB_u)\right] \tag{13}$$

eşitliği kullanılır. Burada, n, 1'den N'ye kadar kaydedilen örnek sayısını göstermektedir. GPS alıcısının her 30 saniyede bir aldığı veriyi kayıt ettiği düşünülürse 24 saatlik gözlem sonucunda N değeri $N = 2 \times 60 \times 24 = 2880$ olur.

STEC değeri psoydo-range ve taşıyıcı faz ölçüleri kullanılarak herhangi bir anda hesaplanabilir. Literatürde, psoydo-range ve taşıyıcı faz ölçülerinin avantajlarını kullanmak için L_4 gözlemlerini P_4 gözlemleriyle kombine eden birçok algoritma sunulmuştur [15, 20, 21, 22, 23]. Bu çalışmada, faz gözlemleriyle yumuşatılmış daha az gürültülü TEC gözlemleri ortaya çıkarılmıştır. P_4 gözlemlerine L_4 gözlemleri kombine edilerek her bir ölçü yolu için yumuşatma değerleri;

$$B^m = \frac{1}{N_{me}}\sum_{n_{me}=1}^{N_{me}}\left(P_{4,u}^{m}(n_{me}) - L_{4,u}^{m}(n_{me})\right) \tag{14}$$

elde edilmiştir. Burada, B^m, m. uydu için yumuşatma değerini; N_{me} , her bir uydu ve alıcı arasındaki ölçü sayısını; n_{me}, her bir uydu ve alıcı arasındaki zaman indisi değerini göstermektedir.

Faz ölçüleriyle yumuşatılmış kod ölçüleri ile STEC belirlemede;

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A}\left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\right)\left(B^m + L_{4,u}^m(n) + c(DCB^m + DCB_u)\right) \quad (15)$$

eşitliği kullanılır.

2.3. VTEC Belirleme ve İzdüşüm Fonksiyonu

Düşey Toplam Elektron İçeriği (VTEC) ve STEC arasındaki izdüşüm fonksiyonu;

$$VTEC_u^m(n) = STEC_u^m(n)/M(\epsilon^m(n)) \quad (16)$$

olarak belirtilmiştir [22-23]. Burada, $M(\epsilon)$ izdüşüm fonksiyonu;

$$M(\epsilon^m(n)) = \left[1 - \left(\frac{R cos\epsilon^m(n)}{R+h}\right)^2\right]^{-1/2} \quad (17)$$

biçimindedir. Eşitlik (16) ve (17)'deki ϵ^m, alıcı ile m. uydunun yerel yükselim açısı; h, iyonosferik ince kabuk modeli yüksekliği; R, dünyanın yarıçapıdır [24, 25].

3. ZAMAN SERİSİ ANALİZİ

Zaman serisi analizi ile STEC değişiminin izlenmesi trend, peryodik ve stokastik bileşenler olarak üç bileşen ile incelenebilir. Bu çalışmada zaman serileri analizi yönteminin stokastik bileşeni incelenmemiştir. t_i $(i = 1,2,3,\dots,N)$ epoklarında hesaplanmış STEC değerleri ($STEC(t_i)$),

$$STEC(t_i) = STEC(t_i)_{trend} + STEC(t_i)_{periyodik} + STEC(t_i)_{stokastik} \quad (18)$$

gibidir. Zaman serisi analizinin ilk aşaması kaba hataların tespit edilmesi ve STEC gözlemlerinden çıkarılmasıdır. Daha sonra STEC serisi trend bileşenini belirlemek için analiz edilir. Zaman serisi içindeki trend bileşeni uzun dönemli değişimleri polinomal fonksiyonlarla zaman ortamında modeller. Ayrıca trend bileşeninin analizi ile sıfır frekansta pik yapan sinyalin olumsuz etkilerinin giderilmesinde kullanılır [26-28]. Trend bileşeni,

$$STEC(t_i)_{trend} = \sum_{k=1}^{m} c_k t_i^{k-1} \quad (19)$$

eşitliğinden hesaplanır. Burada, c_k $(k = 1,2,3,\dots,m)$ parametreleri, fonksiyonun mertebesine bağlı katsayılardır. Bilinmeyen trend bileşeni parametreleri olan c_k katsayıları EKK yöntemine göre istatistiksel olarak $1-\alpha$ anlamlı güven aralığına göre test edilerek kestirilirler. Parametrelerin anlamlı olmaması halinde model genişletilerek anlamlı parametreler elde edilinceye kadar bu işleme devam edilir. Zaman serisi analizinin periyodik kısmının analizinden önce trend bileşeni seriden çıkarılarak,

$$STEC(t_i)_{detrend} = STEC(t_i) - STEC(t_i)_{trend} \quad (20)$$

trend giderilmelidir. Yüksek-frekanslı değişimlerin kısa periyotlu etkilerini ortaya çıkarmak için trendi giderilmiş zaman serisine yüksek-geçiren filtre,

$$STEC(t_i)_{filtre} = STEC(t_{i+2})_{detrend} - 2STEC(t_{i+1})_{detrend} + STEC(t_i)_{detrend} \quad (21)$$

uygulanmalıdır. Frekans ortamında spektral sızmanın en aza indirilmesi için filtrelenmiş veri Hann pencere fonksiyonu;

$$w(i) = 0.5 - 0.5cos\left(\frac{2\pi i}{N}\right) \quad (22)$$

ile çarpılarak pencerelenmiş ve trendi giderilmiş yüksek frekanslı STEC gözlemleri;

$$STEC(t_i)_{pencere} = STEC(t_i)_{filtre} w(i) \quad (23)$$

elde edilir. Trend bileşeni analizini periyodik bileşen analizi takip eder. Bu analiz STEC değerlerinin *cosin*üs ve *sin*üs trigonometrik fonksiyonları ile modellenmesiyle;

$$STEC(t_i)_{periyodik} = \sum_{s=1}^{q} [a_s \cos(2\pi f_s t_i) + b_s \sin(2\pi f_s t_i)] \quad (24)$$

gerçekleşir. Burada, f_s $(s = 1,2,3, \dots, q)$ STEC serisine ait frekanslardır. Bilinmeyen periyodik bileşen parametreleri a_s ve b_s katsayıları EKK yöntemine göre istatistiksel olarak $1 - \alpha$ anlamlı güven aralığına göre test edilerek kestirilirler. Parametrelerin anlamlı olmaması halinde model genişletilerek anlamlı parametreler elde edilinceye kadar bu işleme devam edilir.

f_s frekanslarının bilinmemesi halinde, verilen STEC serisinden bu değerlerin kestirilmesi gerekir. Trend bileşeni giderilmiş serinin zaman ortamından frekans ortamına dönüşümü hızlı Fourier dönüşümü kullanılarak (FFT) gerçekleştirilir. STEC değerlerinin FFT tanımı;

$$X(k) = \sum_{t_i=0}^{N-1} STEC(t_i) e^{-jk\frac{2\pi}{N}t_i} \quad (25)$$

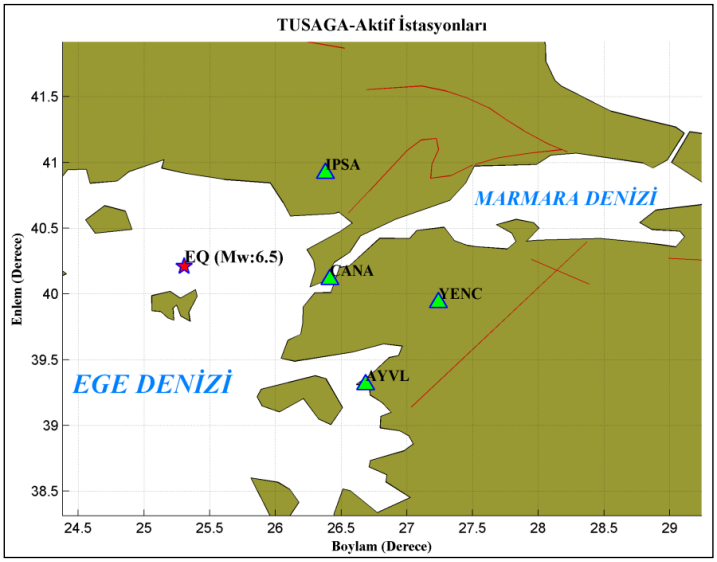
biçimindedir. Burada, $X(k)$ STEC zaman serisi içindeki frekanslardır [26-29]. FFT katsayılarının gücü,

$$P_{xx}(k) = |X(k)|^2. \quad (26)$$

eşitliğinden hesaplanır. STEC serisi içindeki gücü yüksek anlamlı frekanslar, frekansların yoğun olduğu kısımlarda bulunmaktadır [26-28, 30]. Bu frekanslar kullanılarak, zaman serisi analizinin periyodik bileşeninin anlamlı parametreleri a_s ve b_s EKK yöntemine göre kestirilir ve istatistiksel olarak $1 - \alpha$ güven aralığına göre test edilir. Uygulama, parametrelerin hepsi anlamlı oluncaya kadar devam edilir.

4. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada, Ege Denizi'nin kuzeyinde Çanakkale açıklarında 24 Mayıs 2014 tarihinde, saat 12:25:03'te (-3 UT) meydana gelen Ege Denizi Depremi'nin (6.5 Mw) iyonosferde meydana getirdiği değişimlerin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, depremin merkez üssüne yakın TUSAGA-Aktif ağındaki AYVL, CANA, IPSA ve YENC istasyonlarının verileri kullanılmıştır (Şekil 1).

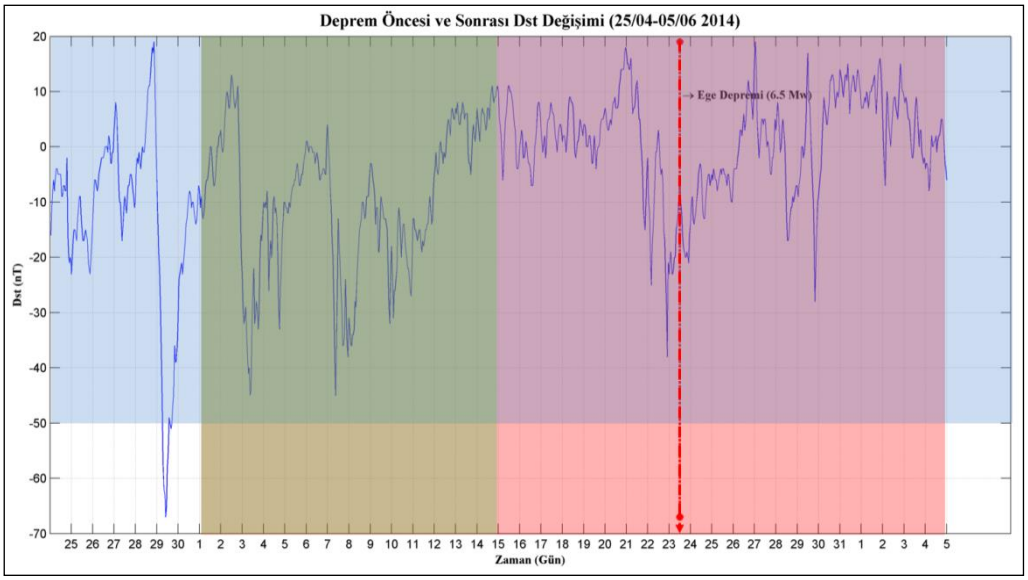


Şekil 1. TUSAGA-Aktif İstasyonları

Şekil 1'deki TUSAGA-Aktif istasyonlarının gözlemleri Harita Genel Komutanlığı'nın erişime açtığı arşivinden [31] indirilmiştir. Bernese v5.0 GNSS yazılımı ile ölçüler yumuşatılarak (Smooth), faz kaymaları (Cycle Slip) ve çok yolluluk (Multipath) etkileri giderilmiştir. Bernese v5.0 yazılımı ile DCB değerleri belirlenmiş ve sonrasında MATLAB ortamında yazdığımız program ile STEC ve VTEC değişiminin sonuç çıktıları alınmıştır.

Çalışmada veriler iki kampanya halinde değerlendirilmiştir. Birinci kampanyada, AYVL, IPSA ve YENC istasyonlarının depremden 29 gün öncesine ve 12 gün sonrasına denk gelen 115. ve 156. GPS günleri arası toplam 42 günlük veri kullanılmıştır. Deprem öncesi ve sonrası iyonosferik TEC değişimleri için Eşitlik (15, 16 ve 17)'den VTEC değişimleri hesaplanmıştır.

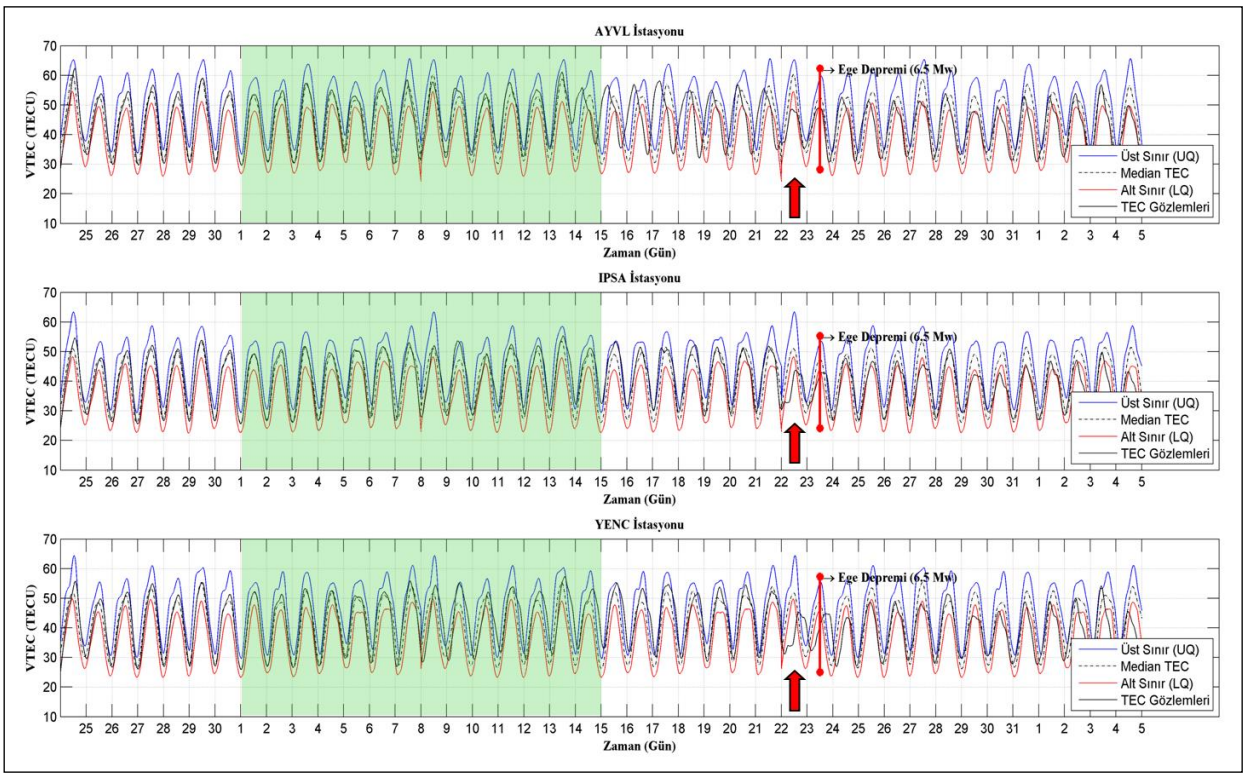
Sonra TEC değerlerinin, jeomanyetik aktiviteden etkilenme durumu araştırılmıştır. Bu amaçla deprem günü olan 24 Mayıs'ı da içine alan 25 Nisan - 5 Haziran 2014 tarihleri arasındaki saatlik jeomanyetik aktivite indeksi (Dst) değişimi değerleri, Kyoto Üniversitesi Jeomanyetizma ve Uzay Manyetizma Enstitüsü Veri Analiz Merkezi'nin web sitesinden [32] alınmıştır. Deprem öncesi ve sonrası günlere ait saatlik Dst değişimi değerlerinin grafiği çizdirilerek incelenmiştir (Şekil 6).



Şekil 2. Jeomanyetik aktivite indeksi (Dst) değişimleri

Şekil 2 incelendiğinde depremden öncesi 1 Mayıs ve deprem sonrası 5 Haziran'a kadar Dst indeksi değişiminin zayıf jeomanyetik aktivite alt sınır değeri olan -50nT değerinden daha alt seviyelere düşmediği görülmüştür [33]. Böylece bu zaman aralığında iyonosferik TEC değerlerini etkileyecek herhangi bir jeomanyetik aktivite değişiminin olmadığına karar verilmiştir.

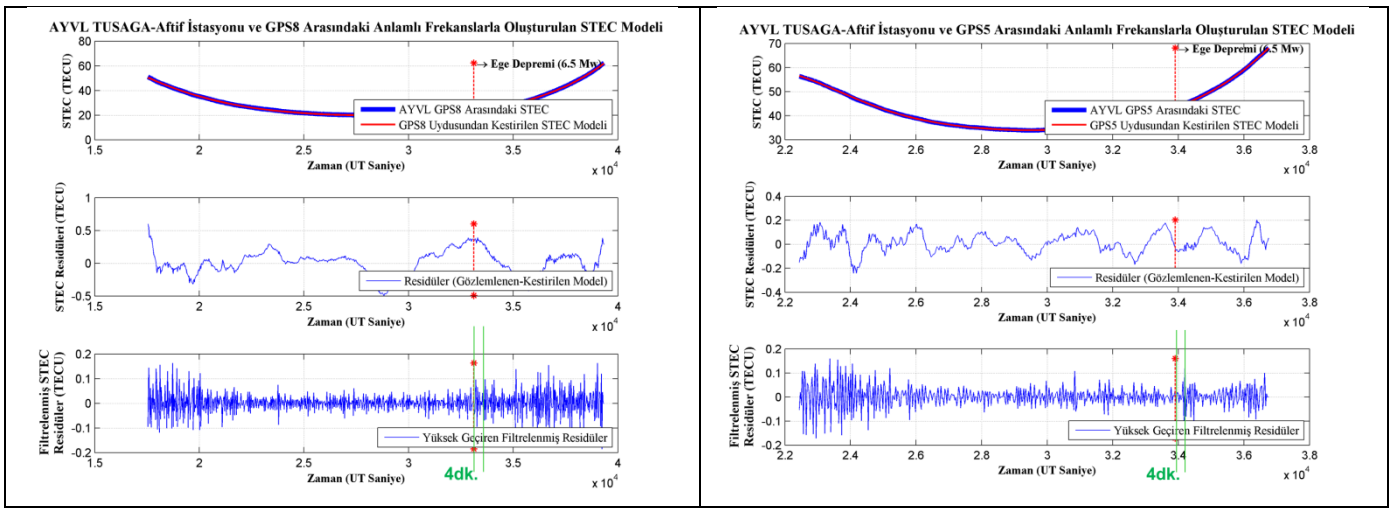
Anormal VTEC değişimlerini ortaya çıkarabilmek ve referans sınır değerlerini belirlemek için deprem öncesindeki 1 Mayıs - 15 Mayıs tarihleri arasında 15 günlük durağan VTEC değişimleri elde edilmiştir. VTEC anomalilerine kısıtlamalı üst ve alt sınır belirlemek için dizi boyunca medyan ($\tilde{X}$), üst kartil (UQ) ve alt kartil (LQ) parametreleri belirlenmiştir. Üst sınır değerler, $\ddot{U}ST = \tilde{X} + 1.5(UQ - \tilde{X})$ ve alt sınır değerleri $ALT = \tilde{X} - 1.5(\tilde{X} - \mathrm{L}Q)$ eşitliklerinden hesaplanarak çizdirilmiştir (Şekil 3).



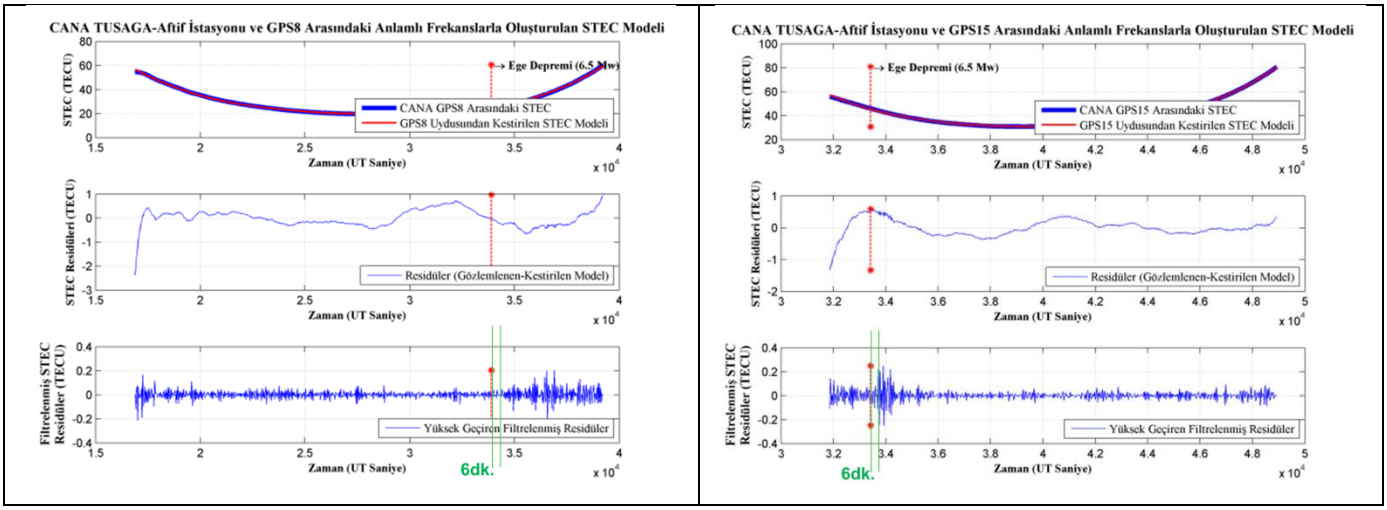
Şekil 3. Ege Denizi Depremi öncesi ve sonrası 42 günlük VTEC değişimi

Şekil 3'de görüldüğü gibi alt sınır değerin altında kalan VTEC değerlerindeki anormal değişimin deprem gününden yaklaşık 1-2 gün önce ortaya çıkmıştır. Elde edilen bu anomalilerden ortalama (μ) ve standart sapma (σ) hesaplanarak güven aralıklarının üst sınır değeri $\mu + 1.34\sigma$ ve alt sınır değeri $\mu - 1.34\sigma$ formüllerinden %70-80 istatistik güvenle bulunmuştur [34-35]. Bu bağlamda Ege Denizi Depremi öncesi ve sonrasında elde edilen 42 günlük VTEC değişimlerinin deprem gününden yaklaşık 1-2 gün öncesinde alt sınır değerin altına düştüğü görülmüştür.

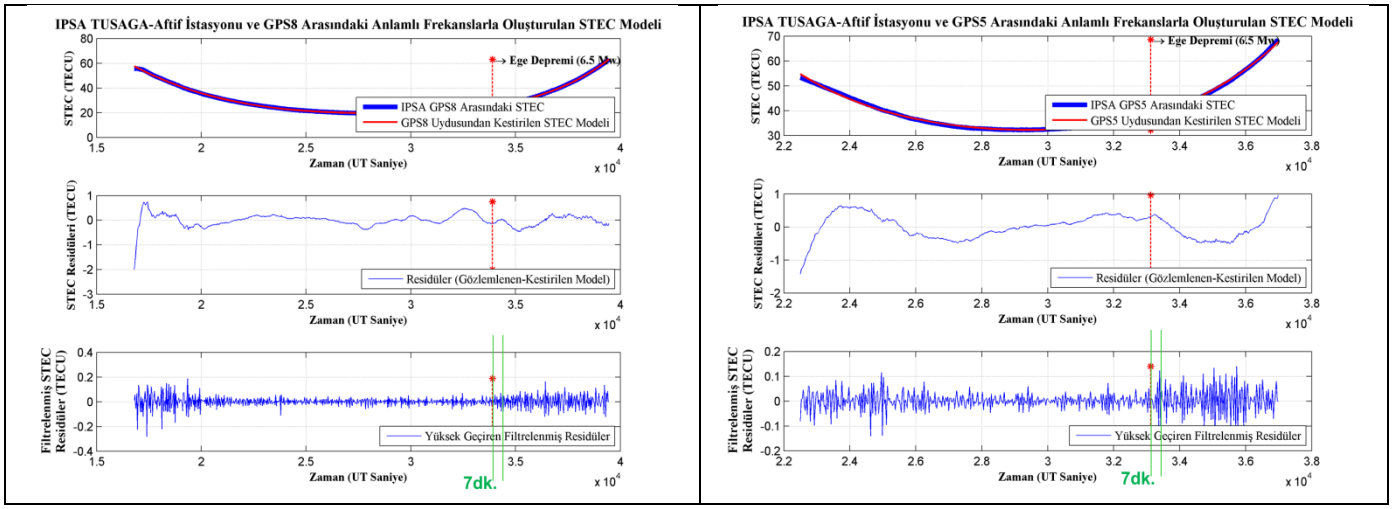
İkinci kampanyada ise AYVL, CANA ve IPSA istasyonlarının deprem olduğu gün olan 144. GPS gününde deprem anında gözlenmiş üç GPS uydusuna ait (GPS05, GPS08 ve GPS15) verilerinden, deprem anında meydana gelen iyonosferik TEC değişimleri incelenmiştir. Eşitlik (15) ile hesaplanan STEC değerlerine zaman serisi analizi yapılmıştır. Analizde yalnızca trend ve periyodik bileşeninin analizi yapılmış, stokastik bileşen analizi yapılmamıştır. Trend ve periyodik model Eşitlik (19 ve 24) ile uzun dönemli etkiler belirlenmiş ve seriden çıkartılarak gözlemler ve model arasındaki kısa periyotlu değişimler elde edilmiştir. Belirlenen bu değişimlere Eşitlik (21)'deki yüksek-geçiren filtre uygulanarak deprem anında STEC değişimlerine etki eden yüksek frekanslı deprem etkilerinin depremden kaç dakika sonra ortaya çıktığı belirlenmiştir (Şekil 4, 5, 6).



Şekil 4. Ege Denizi Depremi anında AYVL istasyonundan gözlenmiş GPS08 ve GPS05 uyduları verilerinden elde edilen STEC değişimleri.



Şekil 5. Ege Denizi Depremi anında CANA istasyonundan gözlenmiş GPS08 ve GPS15 uyduları verilerinden elde edilen STEC değişimleri.



Şekil 6. Ege Denizi Depremi anında IPSA istasyonundan gözlenmiş GPS08 ve GPS05 uyduları verilerinden elde edilen STEC değişimleri.

Şekil (4, 5 ve 6)'te görüldüğü gibi kısa periyotlu değişimlerin STEC değerlerine olan etkileri deprem anından sonra AYVL istasyonu GPS08 ve GPS05 nolu uydulara ait sinyallerde yaklaşık 4 dakika, CANA istasyonu GPS08 ve GPS15 nolu uydulara ait sinyallerde yaklaşık 6 dakika ve IPSA istasyonu GPS08 ve GPS05 nolu uydulara ait sinyallerde yaklaşık 7 dakika sonra ortaya çıkmaktadır.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, AYVL, IPSA ve YENC istasyonlarının 115. ve 156. GPS günü arası VTEC değişimleri deprem öncesi iyonosferik TEC'te meydana gelen değişimlerin belirlenmesi için çizdirilmiş ve depremin meydana geldiği bu bölgede deprem öncesi VTEC değişimlerinin deprem gününden yaklaşık 1-2 gün öncesinde ortaya çıktığı görülmüştür. Yapılan diğer çalışmada ise meydana gelen depremin AYVL, CANA ve IPSA istasyonlarının STEC değerlerine etkisinin depremden yaklaşık 4 ile 7 dakika sonra ortaya çıktığı görülmüştür. Jeomanyetik aktivite (Dst) değerlerinin de 25 Nisan - 5 Haziran 2014 tarihleri arasındaki saatlik değişimlerine bakılmış ve depremin öncesinde ve sonrasında 20nT değerinden daha üst seviyelere çıkmadığı görülmüştür. Sonuç olarak bu tarihler arasında iyonosferik TEC değişimlerini etkileyecek herhangi bir jeomanyetik aktivitenin olmadığı görülmüştür.

Sonuçlar deneysel ve istatistiksel yöntemler ile ortaya çıkarılmış olsa da, deprem öncesi belirtilerin kesin olarak belirlenebilmesi için bölgede daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Ortaya çıkan modeller ancak o bölgede belirlenen öncüleri modelleyebilmektedir diyebiliriz fakat daha fazla dış parametre ile modellemenin yapılması gerekebilir. Farklı bölgeler için yapılan aynı çözümlerde bu aşamada geçerli olmayabilir. Bu amaçla sonuçların daha güvenilir olması için birçok disiplinin ortaklaşa çalışması ile bölgesel modellerin oluşturulması gerekmektedir.

NOT

Bu çalışma, Hitit Üniversitesinde 15-17 Ekim 2014 tarihleri arasında gerçekleştirilen 7. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumunda sunulan "Deprem Kaynaklı Toplam Elektron İçeriği Değişimlerinin Araştırılması: Ege Denizi Depremi (24.05.2014 Mw:6.5)" başlıklı çalışmanın revize edilmiş ve genişletilmiş halidir.

6. KAYNAKLAR

1. Wyss M., 1997, "Second Round of Evaluations of Proposed Earthquake Precursors", *Pure and Applied Geophysics*,149, 1997, 3-16.
2. Pulinets S. A., Boyarchuk K. A., 2004, "Ionospheric Precursors of Earthquakes", *Springer*, New York, NY, USA, 2004.
3. Barnes R. A. and Leonard R. S., 1965, "Observations of ionospheric disturbances following the Alaska earthquake", *J GeophysRes* 70: 1 250−1 253.
4. Liu, J. Y, Chen Y. I, Pulinets, S. A. and Chuo, Y. J., 2000a, "Seismo-ionospheric signatures prior to M>6.0 Taiwan earthquakes". *Geophys Res Lett* 27(19): 3 113−3 116.
5. Liu J. Y, Chuo Y. J. and Chen Y. I., 2001b, "Ionospheric GPS TEC perturbations prior to the 20 September 1999", Chi-Chi earthquake. *Geophys Res Lett* 28: 1 383−1 386.
6. Liu, J. Y., Chuo, Y. J., Shan, S. J., Tsai, Y. B., Chen, Y. I., Pulinets, S. A. and Yu, S. B., 2004, "Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements", *Annales Geophysicae*, 22, 2004, 5, 1585-1593, 10.5194/angeo-22-1585-2004.
7. Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chuo, Y. J. and Chen, C. S., 2006, "A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly", *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111, A5, 2156-2202, 10.1029/2005JA011333.

8. 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.

9. 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.

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

11. 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.

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

13. Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P. and Meindl, M., 2007, "Manual of Bernese GPS Software Version 5.0". Astronomical Institute. University of Bern.

14. Leick, A., 2004, "GPS Satellite Surveying". 3rd ed., *John Wiley and Sons Inc*., New Jersey.

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

16. Komjathy, A., 1997, "Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System". Ph.D. Thesis, Dept. of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 188. Univ. of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada.

17. Liao, X., 2000, "Carrier phase based ionosphere recovery over a regional area GPS network". *M.Sc. Thesis*, Univ. of Calgary, Canada.

18. Makalea, J. J., Kelley, M. C., Sojka, J. J., Pi, X., and Manucci, A. J., 2001, "GPS normalization and preliminary modeling results of total electron content during midlatitude space weather event". *Radio Sci*. 36, 356–361.

19. Warnant, R., 1997, "Reliability of the TEC computed using GPS measurements - The problem of hardware biases". Acta Geod. Geoph. Hung. 32(3– 4), 451– 459.

20. Jakowski, N., Sardon, E., Engler, E., Jungstand, A., and Klahn, D., 1996, "Relationships between GPS-signal propagation errors and EISCAT observations". *Ann. Geophysicae*. 14, 1429– 1436.

21. Komjathy, A., Langley, R., 1996, "An assesment of predicted and measured ionospheric total electron content using a regional GPS network". paper presented at *Nat. Tech. Meet., Inst. of Nav.*, Santa Monica, CA 22–24 January.

22. Lanyi, G. E., Roth, T., 1988, "A Comparison Of Mapped And Measured Total Ionospheric Electron Content Usin Global Positioning System And Beacon Satellite Observations". *Radio Sci*., 23, 483–492.

23. Otsuka, Y., Ogawa, T., Saito, A., Tsugawa, T., Fukao, S. and Miyazaki, S., 2002, "A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan", *Earth Planets Space*, 54, 63–70.

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

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

26. Jenkins, G.M. and Watts, D.G., 1968, "Spectral analysis and its applications", *Holden-Day series in time series analysis*, Holden-Day.

27. Mills, T.C., 2011, "The Foundations of Modern Time Series Analysis", Palgrave Macmillan perspectives in econometrics, Palgrave Macmillan, isbn:9780230290181.

28. Tsay, R. S., 2010, "Frontmatter, in Analysis of Financial Time Series". Third Edition, *John Wiley & Sons, Inc*., Hoboken, NJ, USA. doi: 10.1002/9780470644560.fmatter

29. Chatfield C., 1996, "The Analysis Of Time Series". *Chapman & Hall*/ CRC. 283 pp.

30. Erdogan H., and Arslan N., 2009, "Identification of vertical total electron content by time series analysis". *Digital Sig. Proc.* Volume 19, Issue 4, July, Pages 740-749, ISSN 1051-2004, http://dx.doi.org/10.1016/j.dsp.2008.07.002.

31. http://sunum.hgk.msb.gov.tr/ TUSAGA-Aktif İstasyonlarına ait RINEX gözlem dosyaları (.14O), (Erişim Tarihi: 20 Temmuz 2014).
32. http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/201404/index.html Kyoto Üniversitesi Jeomanyetizma ve Uzay Manyetizma Enstitüsü Veri Analiz Merkezi Jeomanyetik Aktivite Değişimi Değerleri (Dst) (Erişim Tarihi: 29 Temmuz 2014).
33. Loewe, C. A., Prölss, G. W., 1997, "Classification and mean behavior of magnetic storms", *J. Geophys. Res.*, 102(A7), 14209–14213, doi:10.1029/96JA04020.
34. Genceli, M., 1989, "Ekonometride İstatistik İlkeler", *Filiz Kitabevi*, İstanbul.
35. Liu, J.Y., Chen, C.H., Chen, Y.I., Yang, W.H., Oyama, K.I. and Kuo, K.W., 2010, "A statistical study of ionospheric earthquake precursors monitored by using equatorial ionization anomaly of GPS TEC in Taiwan during 2001–2007", *Journal of Asian Earth Sciences*, Volume 39, Issues 1–2, 1 July 2010, Pages 76-80, ISSN 1367-9120, http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.02.012.