

Uzay mekiği tırmanışı, deprem, ve füze fırlatılışından kaynaklanan TEC değişimlerinin GPS ile belirlenmesi

Mosab HAWAREY*, Tefik AYAN

İTÜ İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Depremler ve uzay mekiği tırmanışları gibi değişik enerji kaynaklarının atmosferde sesaltı basınç dalgaları ürettiği bilinmektedir. Bu dalgalar iyonosfer elektron yoğunluğunda dalgalanmayla sonuçlanır. Yeryüzüne ulaşan Global Konum Belirleme Sistemi'nin (GPS) sinyalleri tüm iyonosferi geçer ve iyonosferdeki Toplam Elektron İçeriği'ni (TEC) belirlemek için kullanılabilir. TEC değişimleri ise enerji dalgalarını algılamada kullanılabilir. Bu çalışmada bir uzay mekiği tırmanışı sırasında bırakılan enerji algılanıp, sonra TEC değişiminin bir Algılama Modeli geliştirilmiş ve test edilmiştir. Her bir değişik enerji kaynağı için farklı bir Algılama Modeline ihtiyaç olduğu düşünülmektedir. Kullanılan algoritmanın depremleri, uzay mekiği tırmanışlarını ve güçlü füze fırlatmalarını algılayabildiği gösterilmiştir. Füze fırlatma alanının konumunu belirleme konusunda deneyler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: GPS, toplam elektron içeriği, iyonosfer düzensiz değişiminin algılanması, füze fırlatılışı algılanması, 1999 İzmit depremi.

GPS detection of ionospheric perturbations excited by space shuttle ascent, earthquake, and missile launch

Abstract

It is known that various energy sources like earthquakes and space shuttle ascents produce ultrasonic pressure waves in the atmosphere. These waves result in coupling between neutral molecules and electrons at ionospheric heights. This coupling results in perturbing the ionospheric electron content. The signals of the Global Positioning System (GPS) collected at the surface of earth can be specially processed to determine the Total Electron Content (TEC) since they pass the whole ionosphere. Furthermore, perturbations in TEC can be used to detect energy waves. In this paper, a mathematical formulation is shown and used to detect energy released by a space shuttle ascent reported in the literature. After that, a Detection Model is developed and considered partially efficient in detecting the perturbations excited by two other energy sources: an earthquake and a strategic long-range missile launch. It's thought that different Detection Models are needed to represent different energy releases. On the other hand, it has been verified that the mathematical formulation is capable of detecting earthquakes, space shuttle ascents and strong missile launches. The detection of launches of strong long-range ballistic missiles is a new application that has not been reported in the literature. The paper concludes with a study over the positioning of the 3D location of the missile launch pad.

Keywords: GPS, total electron content, detection of ionospheric perturbations, detection of missile launch, 1999 Izmit earthquake.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Mosab HAWAREY. mhawarey@msn.com; Tel: (535) 767 80 39.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmış olan "Enerjiden kaynaklanan İyonosfer değişimlerinin GPS ile belirlenmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 06.01.2004 tarihinde dergiye ulaşmış, 14.01.2004 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2005 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

Giriş

ABD Savunma Bakanlığı (Department of Defense: DoD) tarafından başlangıçta askeri navigasyon ve konum belirleme için geliştirilen GPS günden güne artan birçok sivil uygulama için yeni bir seçenek olmuştur. GPS araştırma ve uygulamalarındaki bu olağanüstü büyüme üç boyutlu bağıl konumların yüzlerce metreden binlerce kilometreye kadar olan bazlarının, bir kaç milimetreden bir santimetreye kadar hassasiyetle elde edilmesi gibi birçok nedenden dolayı olmuştur (Segall ve Davis, 1997). Bu sivil uygulamaların arasında sesaltı basınç dalgaları halinde atmosferde yayılan büyük enerji bırakımlarının algılanması askeri uygulamalara doğru potansiyel eğilimi olan yerini almaktadır. GPS verisinin içerisinde, yeryüzünden 20200 km yükseklikteki GPS uydularından yer yüzeyindeki GPS alıcılara doğru olan sinyal yolu boyunca elektron içeriğini hesaplama yeteneği olduğu ispatlanmıştır. Genellikle çift-frekanslı GPS alıcıları tarafından toplanan gözlemlerden hesaplanan Toplam Elektron İçeriği (TEC)'in özel sinyal işlenmesinin depremler, uzay mekiği tırmanışları veya maden patlamaları gibi yüzey veya yüzeye yakın kaynakların neden olabileceği enerji yayılımını algılama potansiyeli olduğu yayınlanmıştır (Calais ve Minster, 1996; Calais ve Minster, 1998; Hawarey, 2002).

Bu makededeki amaçlar: 1) Literatürde 1993'deki uzay mekiği tırmanışı için rapor edilen sonuçları yeniden üretmek, 2) O tırmanışın değişim sinyalini temsil eden bir Algılama Modeli geliştirmek, 3) Aynı algoritmayla 1999 İzmit depremi sırasında açığa çıkan enerjiyi algılamak, 4) Aynı algoritmayla 2000 yılında fırlatılan stratejik uzun menzilli bir Minuteman II füzesinden bırakılan enerjiyi algılamak, 5) Geliştirilen Algılama Modelinin deprem ve füze fırlatılışını algılamadaki verimliliğini test etmek, 6) Füze uygulamasında algılanan değişim sinyalini kullanarak füze fırlatma rampasının 3 boyutlu konumunun kestirilmesi olarak sıralanabilir.

Matematiksel temeller

GPS in uzay kısmı hemen hemen dairesel 55 derece eğimli yörüngelerde çalışan 24 faal uydudan

oluşmaktadır. Yörünge yüksekliği yaklaşık olarak 20200 km.dir ki bu da yaklaşık olarak dünya merkezinden 26000 km'ye karşılık gelir (U.S. Naval Observatory, 2003). Temel L-Band frekansını, $f_0 = 10.23$ MHz, her uydudaki atomik saatler üretir. L_1 taşıyıcı frekansı f_0 'ı 154 ile çarparak üretilirken, L_2 taşıyıcı frekansı f_0 'ı 120 ile çarparak üretilir. Böylece $L_1 = 1575.42$ MHz ve $L_2 = 1227.60$ MHz olur. Bu iki taşıyıcı frekansa benzer olarak iki PRN (Pseudorange Noise) kodu vardır: Kaba-Kazanım (Coarse-Acquisition, C/A) kodu ve Prezisyon (Precision, P) kodu. Standart Konum Belirleme Servisi olarak da bilinen C/A kodu sadece L_1 taşıyıcısı üzerine modüle edilir. Dalgaboyu yaklaşık olarak 300 m, periyodu 1 milisaniye ve çip hızı (chipping rate) 1.023×10^6 chip/s dir. Prezisyonlu Konum Belirleme Servisi olarak da bilinen P kodu hem L_1 hem L_2 taşıyıcıları üzerine modüle edilir. Dalgaboyu 30 m, periyodu 7 gün ve çip hızı 10.23×10^6 chip/s dir. PRN kodları içinde hiçbir veri bilgisi olmadığını göstermek için "bit" yerine "çip" terimi kullanılır (Kaplan, 1996).

İyonosfer kırılma indisi:

$$n_{\text{iyon}} = 1 - \frac{f_N^2}{2f^2} \quad (1)$$

olarak ifade edilir. Burada f sinyal frekansı ve f_N plazma rezonans frekansıdır. f_N değerleri genelde 10-20 MHz (Parkinson vd., 1996) arasındadır. Bu ifadeden çıkılarak, İyonosfer grup gecikme ifadesi:

$$\Delta t = \frac{40.3}{cf^2} \int N ds \quad (2)$$

olarak elde edilebilir (Seeber, 1993). Burada 40.3 sabitinin birimi m^3/s^2 dir. $(\int N ds)$ niceliği her uydudan GPS alıcısına olan yol boyunca toplanan TEC'dir ve birimi elektron/metre² (el/m^2)'dir. Denklemde yer alan "c" ifadesi ışık hızıdır. TEC terimi Denklem (2)'de yerine yazılırsa:

$$\Delta t = \frac{40.3}{cf^2} TEC \quad (3)$$

ifadesi elde edilir. GPS'in yukarıda sözü edilen iki taşıyıcı frekansı düşünülerek, denklem (3) yeniden yazılırsa:

$$\rho_1 = \frac{40.3}{f_1^2} \text{TEC} \quad (4)$$

$$\rho_2 = \frac{40.3}{f_2^2} \text{TEC} \quad (5)$$

olarak yazılabilir. İki frekanstan hesaplanan pseudorange'ler ρ_1 ve ρ_2 gözlem olarak kabul edilir. Bunlar uzaklık gözleminin ayırgan (dispersive) kısmıdır. Görüldüğü gibi, gecikme elektron sayısı ile doğru orantılı ve f_2 ile ters orantılıdır (Strang ve Borre 1997). Eğer sonraki ifade öncekinden çıkarılırsa

$$\text{TEC} = \frac{\rho_1 - \rho_2}{40.3} \times \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (6)$$

ifadesi elde edilir. İyonosferin taşıyıcı faz yayılımında ilerlemeye neden olurken kod yayılımında bir gecikmeye neden olmasından dolayı, bunu telafi etmek için $(f_2^2 - f_1^2)$ yerine $(f_1^2 - f_2^2)$ yazarak işaretin tersi alınmıştır. TEC'in mutlak değerini hesaplayabilmek için dört GPS gözlemi kullanılmıştır: L1 ve L2 taşıyıcı faz gecikmeleri ile P1 ve P2 (P-kodu pseudorange'leri) grup gecikmeleri, hepsi uzaklık biriminde ifade edilmiştir. Aşağıdaki lineer kombinasyonlar hesaplanmıştır:

$$L_G = \frac{L_2 - L_1}{\lambda_2} \quad (7)$$

$$P_G = \frac{P_2 - P_1}{\lambda_2} \quad (8)$$

Burada λ_2 ikinci frekansın dalga boyudur. (7) denklemindeki L_G hassas ve düzgündür fakat bilinmeyen bir faz belirsizlik sabitiyle yanlıdır. (8) denklemindeki P_G gürültülüdür ve daha az hassastır ama belirsiz değildir. TEC'in mutlak ve hassas bir tahmini elde edebilmek için

belirsizlik sabiti B hesaplanarak L_G değerleri P_G üzerine uydurulur:

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{Gi} - L_{Gi}) \quad (9)$$

ile hesaplanır. Buradaki (n) ise, bilinen bir bazda faz ölçülerin sayısıdır. O zaman, mutlak TEC şöyle hesaplanır (Calais ve Minster 1998; Calais vd., 1998; Hawarey, 2002) :

$$\text{TEC} = \frac{\lambda_2}{40.3} \frac{(f_1^2 f_2^2)}{(f_1^2 - f_2^2)} (B - L_G) \quad (10)$$

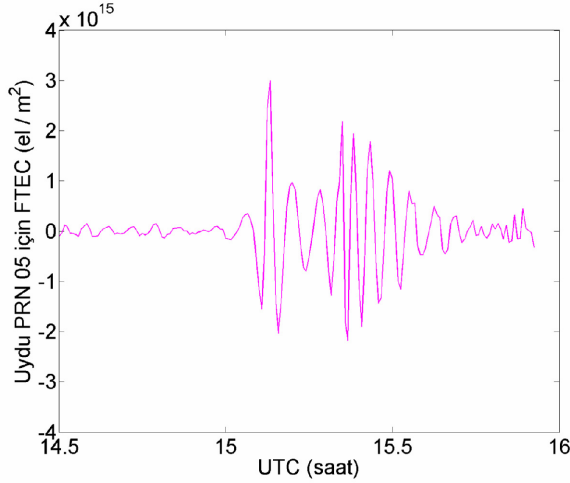
Son olarak, TEC değerlerine beşinci dereceden yüksek-geçiş Butterworth filtresi uygulanır. Bir yüksek-geçiş filtresi yüksek frekansları geçiren ve düşük olanları azaltan veya reddeden bir filtredir. Bir kesim (cut-off) frekansı belirlenmelidir. Bu frekans geçilen ve reddedilen frekanslar arasındaki sınırı belirler. İyonosfer değişimlerinin enerjisinin 200-300 saniyelik periyot bandında yoğunlaşmasından dolayı, ideal değer yaklaşık 0.003 Hz'e eşit bulunmuştur (300 saniyelik = 5 dakikalık bir kesim periyoduna denk gelir).

Uzay mekiği tırmanışı

İnceleme konusu 1 Şubat 2003'te 28. görevinden dönüşte parçalanan ve mürettebatı ölen Uzay Mekiği Kolombiya'nın 15inci görevindeki (STS-58) tırmanışıdır. STS-58 görevinin kalkışı Cape Canaveral, Florida, ABD Kennedy Uzay Merkezinden 18 Ekim 1993 saat 14:53 UTC'de olmuştur. STS-58 görevi için ilk kısım tırmanış her iki Katı Roket İlerleticisi kalkıştan 123.8 saniye sonra dış tanktan ayrılınca bitmiştir. İkinci kısım tırmanış 391.76 saniye sürmüştür ve yeryüzünden 287 km yükseklik ve 39 derece eğimli bir yörüngede uzay mekiği motorunun durmasıyla sona ermiştir. Bu demektir ki bütün tırmanış 515.56 saniye sürmüştür. İkinci kısım tırmanış esnasında kalkıştan yaklaşık 210 saniye sonra mekik hedef yörüngesine ulaşana kadar hemen hemen yatay bir şekilde 2.5 km/s den 7.5 km/s ye ivmelenmiştir. Bu 5 dakikalık hemen hemen yatay tırmanış esnasında mekik doğu-kuzeydoğuya yönelmiştir ve Bermuda adasında çalışan 30 saniye aralıkla GPS gözlemleri

toplayan sürekli bir GPS istasyonunun 200 km kadar yakınından uçmuştur.

Kalkışın 14:53 UTC'de gerçekleşmesinden dolayı, ilgilenilen zaman 14:30 UTC'den 16:00 UTC'ye kadar alınacaktır. Hawarey (2002)'in bahsettiği üzere, PRN 05 ve PRN 16 uydularının sinyallerinde İyonosfer değişimi algılanmıştır. PRN 05 uydusunun filtrelenmiş TEC zaman serisi (FTEC) Şekil 1'de verilmiştir.

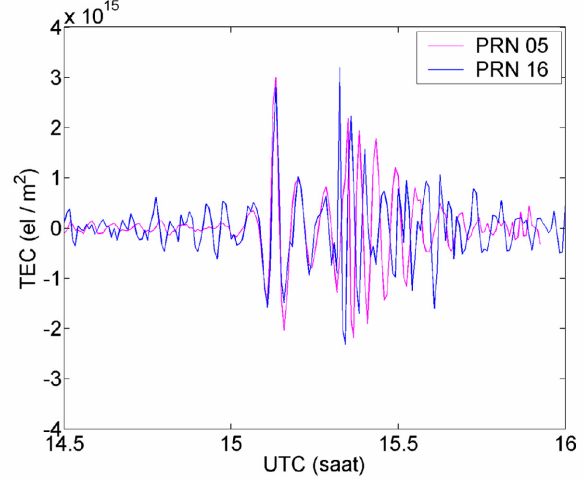


Şekil 1. PRN 05 uydusu için Filtrelenmiş TEC zaman serisi (FTEC)

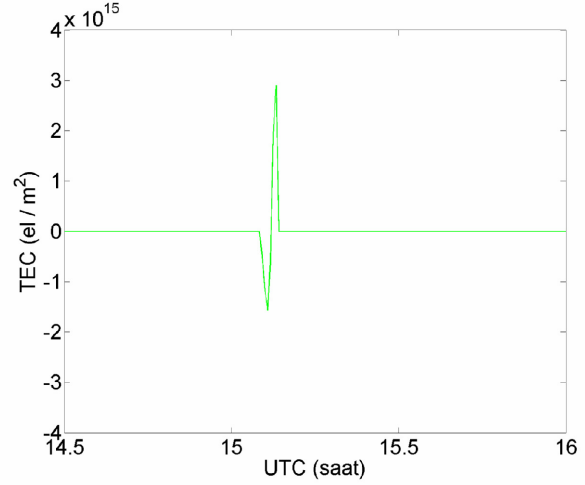
PRN 16 uydusunun sinyalindeki İyonosfer değişimi PRN 05 uydusununkinin algılanmasından iki buçuk dakika sonra algılanmış ve iki FTEC arasındaki ölçek farkı 8'e eşittir. Bu nedenle PRN 16'nın FTEC'i PRN 05'in FTEC'nin ölçeğine göre ölçeklendirilip sola 2.5 dakika kaydırılmış ve Şekil 1'de görülen sinyal üzerine çizilmiştir. Ortaya çıkan sonuç Şekil 2'de gösterilmektedir. Şekil 2'de görüldüğü gibi değişimin ilk varışında neredeyse mükemmel bir çakışma elde edilmiştir. Üç dakika süren bu ilk impuls Algılama Modeli geliştirmek için kullanılabilir. Bunu yapmak için bütün diğer değerler sıfıra eşitlenip iki impuls sinyalinin ortalaması alınmış ve Şekil 3'te görülen hedeflenen Algılama Modeline ulaşılmıştır (Hawarey, 2002).

Hiç şüphe yok ki bu Algılama Modeli her iki uydunun (PRN 05 ve PRN 16) FTEC'leri üzerindeki değişim sinyalleri ile çok iyi örtüşür ve bu uyduların sinyallerinden üretildiği için

kolaylıkla algılar. Bu çalışmada daha sonra denenecek olan şey bu Algılama Modelinin uzay mekiği tırmanışı haricindeki enerji kaynaklarının yayılan İyonosfer değişimlerini algılayıp algılayamayacağıdır.



Şekil 2. Uydu PRN 05 ve uydu PRN 16 için üstüste kaydırılmış FTEC'leri



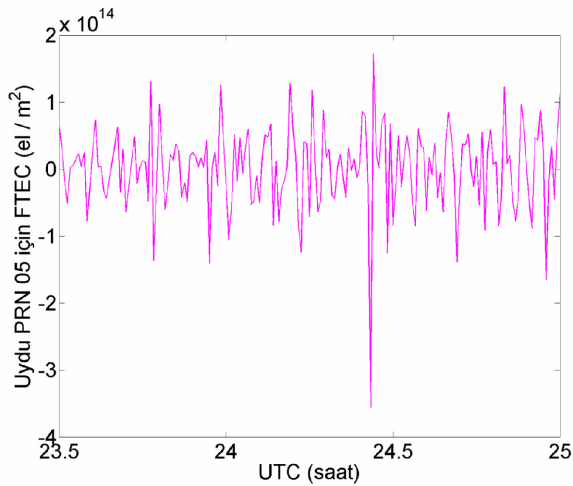
Şekil 3: Geliştirilen algılama modeli

1999 İzmit depremi

Bu deprem moment büyüklüğü 7.4, yüzey dalga büyüklüğü 7.8 ve derinliği 17 km olarak 17 Ağustos 1999'da saat 00:01:39.80 UTC'de İzmit İlinde meydana gelmiştir. Depremin merkezinin enlemi 40.702 derece kuzey ve boylamı 29.987 derece doğudadır (USGS 1999).

Deprem merkezine komşu İzmit'te Akdeniz GPS Ağına ait TUBI isimli bir sürekli GPS istasyonu vardır. 16, 17, 18 Ağustos 1999

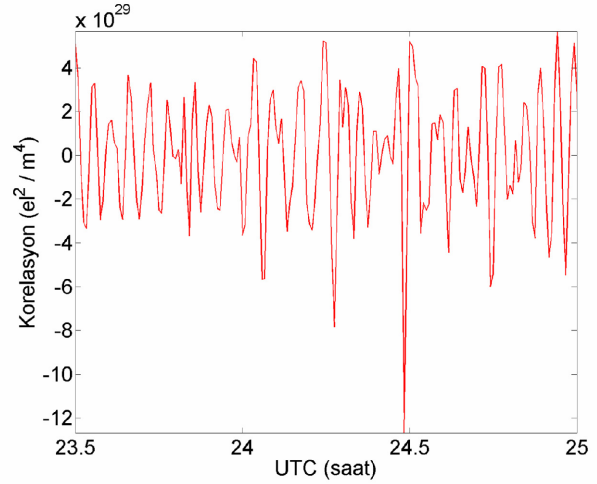
tarihlerinde bu istasyon tarafından toplanan veri RINEX formatında SOPAC (2000)'ten elde edilmiştir. Bu verinin UTC zamanına göre günlük olarak düzenlenmesinden dolayı ve depremin gece yarısından sadece bir dakika sonra meydana gelmesi nedeniyle bu üç RINEX dosyası saat 23:30'dan saat 25:00'e kadar olan veriyi içerecek şekilde iki dosyada toplanmıştır. P1 gözlemi hiç toplanmadığı için C1 gözlemi onun yerine alınmıştır. Deprem saat 00:01:39.80 UTC'de gerçekleştiğinden dolayı, ilgilenilen zaman aralığı 23:30 UTC'den 25:00 (sabah 01:00) UTC'ye olarak alınmıştır. Tam geceyarısı vaktine denk gelen anda (epok UTC=00:00:00) ve ondan 30 saniye sonrasında (epok UTC=00:00:30) orjinal RINEX dosyalarında herhangi bir GPS gözlemi yoktur. Herhangi bir 30 saniyelik aralıkta gözlemlerin olmaması yukarıdaki Matematiksel temeller bölümünde anlatılan matematiksel filtreleme algoritmasının yanlış çalışmasına neden olur. Bunu önlemek için epok 00:00:00 epok 23:59:30 olarak, epok 00:00:30'da epok 00:01:00 olarak alınmıştır. Deprem gecesinde iyi gözlenmiş dört uydudan PRN 05, TEC değişimi farkedilir şekilde algılayan tek uydudur. Bunun FTEC'i aşağıdaki Şekil 4'te verilmiştir:



Şekil 4. Uydud PRN 05 için FTEC

Uzay mekiği fırlatılışı durumu için geliştirilen algılama modelinin İzmit depreminde yayılan enerjiyi algılamadaki verimliliğinin testi, Şekil 3'te verilmiş olan Algılama Modeli'nin Şekil 4'te görülen filtrelenmiş TEC zaman serisi ile çapraz korelasyonu yapılarak gerçekleştirilebilir.

Herhangi bir hesap yapmadan önce bu iki şekile basit bir bakış desendeki büyük benzerliği ortaya çıkarır. Bu Model ile değişim impulsü arasında iyi bir korelasyon çağırıştırır. Bu korelasyon incelemesi aşağıda Şekil 5'te çizimsel olarak gösterilmiştir:



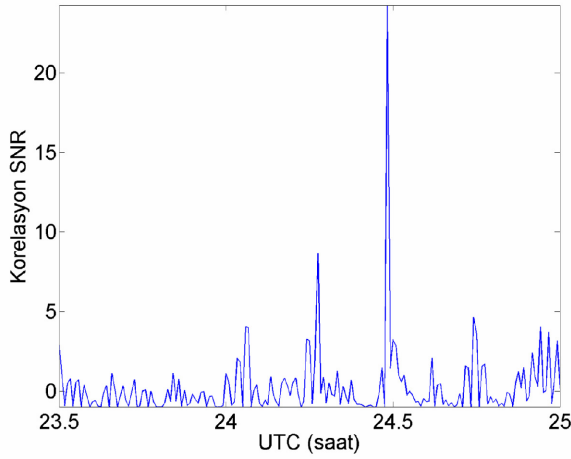
Şekil 5. Algılama model ile PRN 05 uydusunun FTEC'i arasındaki korelasyon

Bu sonuç başlangıçta Algılama Modeli ile TEC zaman serisi arasında güçlü bir korelasyon izlenimi vermektedir. Algılama Modelinin bu depremin TEC değişimini algılamadaki verimliliğini ve Şekil 4'teki orjinal FTEC'e herhangi bir gelişme katıp katmadığını değerlendirebilmek için sinyal-gürültü oranı (signal-to-noise ratio: SNR) çizimleri iyi bir araç olarak düşünülmektedir. Tanım olarak, SNR ortalama sinyal seviyesi ve gürültü tabanının ortalama seviyesi arasındaki seviye farkıdır. Bu da gürültünün karesinin ortalama bir değerini, gürültü tabanı (Noise Floor: NF), bulup bu NF değerini tüm sinyalin karesinden çıkarıp sonucu NF değerine bölerek hesaplanır. Matematiksel olarak C sinyali için:

$$NF = \text{ortalama } (C_{\text{nois}}^2) \quad (11)$$

$$SNR = (C^2 - NF) / NF \quad (12)$$

olarak ifade edilir. Şekil 4 için SNR değeri 32'ye kadar çıkarken Şekil 5 için bu değer 25'i aşmamıştır. Bu durum Şekil 6'da filtrelenmiş haliyle görülmektedir.



Şekil 6. Korelasyon sinyalinin SNR çizimi

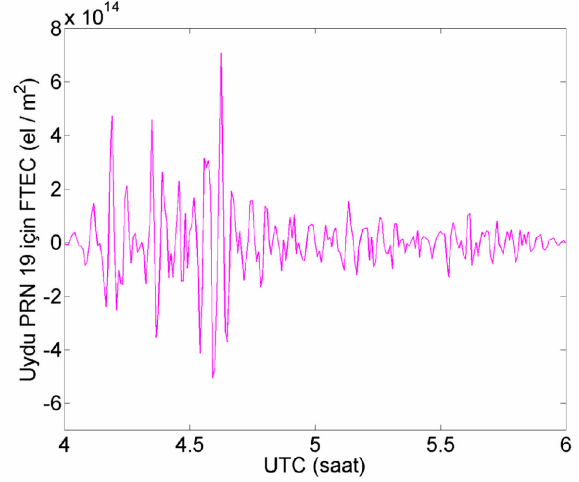
Bu iki SNR değeri, Algılama Modelinin deprem tarafından yayılan enerji yüzünden oluşan TEC değişimini algılamada kısmen verimli olduğunu göstermektedir. Orijinal FTEC'in SNR değeri (32) korelasyon SNR değerinden (25) büyüktür. Halbuki Çapraz-Korelasyonun amacı, Algılama Modeline benzer TEC'teki düzensiz değişimin sinyalini gürültü seviyesine yakın olsa da büyütüp, gürültünün etkisini azaltmaktır. Daha detaylı analiz ve tartışma aşağıdaki son bölümde yer alacaktır.

Stratejik uzun menzilli Minuteman II füze fırlatılışı

Burada incelenecek durum 8 Temmuz 2000 saat 04:18 UTC'de Kaliforniya'daki Vandenberg Hava Kuvvetleri Üssünden (Vandenberg Air Force Base: VAFB) bir Minuteman II füzesinin fırlatılmasıyla başlayan 100 milyon dolarlık bir deneydir. Güney Kaliforniya'da Güney Kaliforniya Entegre GPS Ağı (Southern California Integrated GPS Network: SCIGN) olarak adlandırılan yoğun bir sürekli GPS istasyon ağı mevcuttur. VNDP adlı GPS istasyonu VAFB'dedir. Minuteman II'nin fırlatılışı esnasında bu istasyon tarafından toplanılmış veri yakınlardaki diğer 6 istasyon tarafından toplanan veriyle beraber incelenmiştir. Bu istasyonlar CRU1, CUHS, LVMS, ORES, OVLS ve SRS1 dir. TEC değişimleri PRN 19 uydusunun bütün yedi filtrelenmiş TEC zaman serilerinde çıkmış gözükmemektedir.

Şekil 7'de görüldüğü üzere, TEC değişimlerinin algılanmasının füzenin fırlatılışından yaklaşık

16 dakika sonra 04:34 UTC civarında olduğu düşünülmektedir. VNDP istasyonunu örnek olarak PRN 19 GPS uydusu için füzenin fırlatıldığı gece saat 04:00 UTC'den 06:00 UTC'ye kadar FTEC değişimi Şekil 7'deki gibidir:

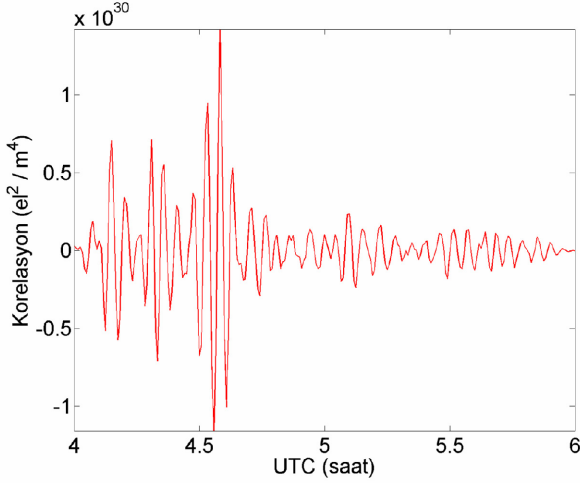


Şekil 7. Uydu PRN 19 için FTEC

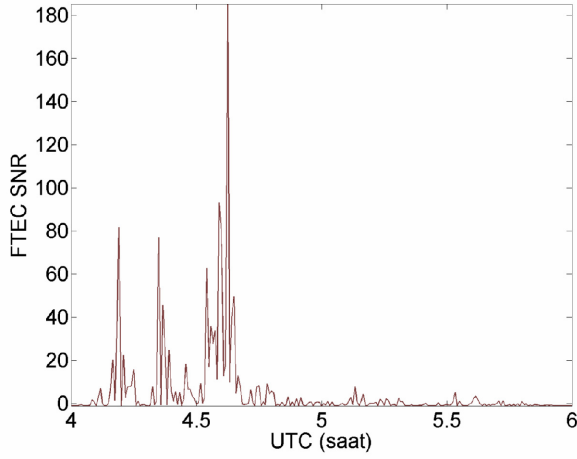
Diğer altı FTEC çizimi Şekil 7'ye benzemekte iken, algılama anları arasında farklılıklar vardır. Bu algoritma kullanılarak bir füze fırlatılışının neden olduğu TEC değişimlerinin algılanması literatürde daha önce belgelenmediği için bu sonuçların doğrulanması gerekmektedir. Bunun için ilgilenilen zaman penceresi için saat 04:12 UTC den 05:00 UTC ye kadar olan aralıkta füzenin fırlatılışından bir gün öncesi ve bir gün sonrası için FTEC'ler üretilmiştir. Bütün sonuçlar, Şekil 7'de görülen TEC değişimlerindeki sıçramalı değişimleri içermektedir.

Şekil 3'te gösterilen Algılama Modelinin verimliliği, Şekil 7'te gösterilen VNDP istasyonunun FTEC ilişkilendirerek test edilebilir. Bu korelasyonun sonucu Şekil 8'de görülmektedir.

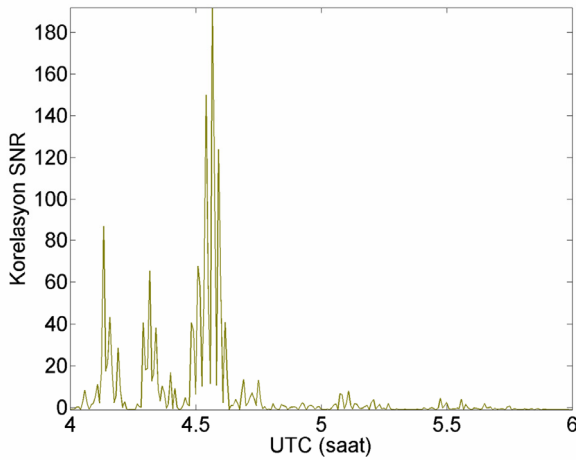
Algılama Modelinin verimli olup olmadığını görebilmek için Şekil 7'deki VNDP FTEC için, ayrıca Şekil 8'de gösterilen sinyal için SNR çizimleri de üretilmiştir. Burada elde edilen sonuçlar Şekil 9 ve Şekil 10'da grafikler halinde verilmiştir.



Şekil 8. Algılama modeli ve VNDP'nin FTEC'i arasındaki korelasyon



Şekil 9. FTEC sinyalinin SNR çizimi



Şekil 10. Korelasyon sinyalinin SNR çizimi

Füze rampasının konumunun kestirilmesi

GPS sinyalinin İyonosferin en aktif katmanı olan 250-300 km yükseklikte bulunan kesiti deldiği noktaya İyonosfer Noktası (Ionospheric Point: IP) adı verilmektedir. Füze rampasının koordinatları için iyi bir başlangıç değeri bulmak çok önemlidir çünkü füze fırlatılışıyla yayılan enerji yayılımının hızı bilinmemektedir. Buna ek olarak, füze rampasından TEC değişimlerinin algılanması anındaki her yedi IP'e olan uzaklık bilinmemektedir.

Önce sabit GPS istasyonlarının bilinen koordinatları ile füze rampasının ilk yaklaşık konumu olan (LS0) bilinen koordinatlarından füze rampasının herbir alıcıya uzaklıkları hesaplanmıştır. LS0'ın (34° 35' 00'') kuzey enleminde ve (-120° 37' 53'') batı boylamında olduğu ele alınmıştır (USGS 1959). Hesaplanan uzaklıklar Tablo 1'in ilk kolonunda gösterilmiştir.

Tablo 1. Baz uzaklıkları, algılama anları ve enerji yayılma süreleri

GPS İstasyonu	LS0'dan olan uzaklık (km)	Algılama Anı (UTC)	Enerji Yayılma Süresi (dk)
VNDP	3.296	4:35:30.12	17.502
ORES	36.666	4:34:59.88	16.998
SRS1	82.714	4:34:59.88	16.998
CUHS	96.305	4:34:00.12	16.002
CRU1	99.256	4:34:30.00	16.500
OVLS	139.777	4:33:00.00	15.000
LVMS	141.048	4:33:00.00	15.000

Diğer yönden herbir istasyondaki filtrelenmiş TEC zaman serileri incelenerek, enerjinin sinyale ulaştığı an saptanmıştır. Bu an zaman serisinde minimum impulse karşılık gelen zaman kesiti olarak alınmıştır.

Fırlatmanın saat 4:18 UTC'de gerçekleştiği akılda tutularak, her GPS istasyonunun algılama zamanı ile fırlatma anı arasındaki fark, enerjinin herbir istasyondan algılanan GPS sinyaline ulaşma süresi belirlenmiştir. Bu değerler de yukarıdaki Tablo 1'de gösterilmiştir.

Kabul edilen 300 km yükseklikte algılamanın gerçekleştiği anda füze rampasından her yedi

IP'e olan uzaklık hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2: LS0'dan IP'lere mesafeler

GPS İstasyonu	Mesafe (km)
VNDP	301.9
ORES	308.4
SRS1	314.9
CUHS	328.1
CRU1	322.6
OVLS	345.5
LVMS	348.5

Tablo 2'de yer alan değerleri elde etmek için enterpolasyon yapılmıştır, çünkü (NGS, 1999-2000)'den elde edilen efemeris verisinin kayıtları, 15-dakikalık aralıklarla kaydedilmiştir. Halbuki Tablo 1'de gösterilen algılama anlarının tümü bir aralık içinde meydana gelmiştir. Yapılan enterpolasyon lineerdir.

Her bir istasyon için Tablo 2'de yer alan uzaklıklar, enerjinin yayılma yörüngeleriymiş gibi kabul edilerek enerji yayılma hızlarını hesaplamada kullanılmıştır (Tablo 3). Enerji elbette her bir istasyona gelen sinyale ayrı yollardan yayılarak gitmektedir ve elbette katedilen bu yollar boyunca ortam kırılma indisleri de farklı olacaktır. Ama buna rağmen bir ortalama alındığında elde edilen yaklaşık 334 m/s değeri benzer çalışmalarda açıklanan enerji yayılma hızı ile benzerlik göstermektedir. Örneğin (Calais ve Minster 1998)'de uzay mekiği tırmanışı ile ilgili şu ifade yer almaktadır: “*We obtain a velocity of the disturbance front of 300 to 600 m/s. This result is consistent with sound velocities below 350 km*”.

Ortalama yayılım hızı 333.959 m/s olarak Tablo 1'de enerji yayılım süreleri ile çarpılması sonucu Tablo 4'ün ilk kolondaki gösterilen değerler elde edilmektedir. Buradaki değerlerin Tablo 2'de gösterilen mesafelerden oldukça farklı olduğu açıktır. Bu farklar daha önce yapılan birkaç kabulü şüphe altında bırakır. Örneğin fırlatılış rampasının LS0 koordinatlarının doğru değerlerine ulaşmak mümkün olmamıştır ve VAFB ile yapılan kişisel görüşmelerden de “Bilgi gizlidir”

gerekçesiyle bir sonuç alınamamıştır (Bonilla, 2003). VAFB ABD'nin en büyük Hava Kuvvetleri üslerinden bir tanesi olup 399 km² lik alana ve 1100 binaya sahiptir. VAFB nin bu büyük alanı ve 8 Temmuz 2000'de fırlatılan füzenin rampasının kesin koordinatları bilinmediğinden dolayı bir belirsizlik vardır.

Tablo 3: Enerji yayılım hızları ve ortalama değer

GPS İstasyonu	Yayılım Hızı (metre/saniye)
VNDP	287.511
ORES	302.447
SRS1	308.794
CUHS	341.813
CRU1	325.886
OVLS	383.947
LVMS	387.312
Ortalama Yayılım Hızı	333.959

Tablo 4: Enerjinin yayılımının IP'lerine hesap edilmiş mesafeleri ve Tablo (5.2) ile farklar

GPS İstasyonu	Hesaplanan mesafeler (km)	Fark (km)
VNDP	350.696	48.775
ORES	340.597	32.138
SRS1	340.597	25.664
CUHS	320.640	-7.541
CRU1	330.619	7.992
OVLS	300.562	-44.99
LVMS	300.562	-48.018

Diğer yönden, kabul edildiği gibi algılamanın gerçekleştiği İyonosferde değişimin gerçekleştiği yüksekliğin 300 km'ye eşit olduğu da bir varsayımdır. Keza bütün TEC değişimlerinin tam aynı yükseklikte yer almaları ikinci varsayımdır. Mesela enerjinin fırlatma alanından VNDP sinyaline karşılık gelen IP'e kadar katettiği mesafe Tablo 4'te 350.696 km olarak verilmiştir ki bu değer Tablo 2'de verilen 300 km yüksekliğe denk gelen 301.921 km'lik mesafeden oldukça büyüktür. Tablo 2 ve tablo 4'e hızlı bir bakış, bir GPS istasyonunun sinyalinden bir diğerinin sinyaline, değişimin meydana geldiği yükseklik değerindeki garip dalgalanmayı ortaya çıkar-

maktadır. Başka şüpheli bir kabul ise Tablo 1'de verilen enerji yayılma süreleridir. Bu süreler filtrelenmiş her bir TEC zaman serisinin minimum impuls anına denk olacak şekilde alınmıştır. Ancak TEC'in filtrelenmiş zaman serilerinden açıkça görüldüğü gibi, değişim tek bir vuruş ile değil aralıklı birkaç vuruşla gösterilmektedir.

Gerçek hayatta başka bir teknik problem gözden kaçırılmamalıdır: füze rampasının 3B konumunu kesin olarak belirlemek için ve füze rampasından IP'lere olan mesafe değerlerinin kullanılması için bu noktaların 3B koordinat kümeleri hesaplanmalıdır. Geometrik bir bakış açısıyla 7 GPS alıcısının bilinen konumları, bir GPS uydusunun bilinen konumu ve IP'lere olan bilinen mesafeler IP'lerin koordinatlarını hesaplamaya yeterli değildir. Bunun nedeni düzensiz değişim anında, 3B uzayda her yedi GPS alıcısını GPS uydusuna bağlayan yedi sabit hattın olmasıdır. Tablo 2'de hesaplananlar gibi füze rampasından IP'lere olan her bir mesafe, her silindirin ucunda bir yarım-küre başlığın olduğu her yedi hattın etrafını çeviren 'dolü' bir silindir oluşturmaktadır. 7 silindirin kesişimi GPS uydusunun yakınında içinde sonsuz sayıda noktanın olduğu katı bir 3B cisimdir. Bu silindirlerin 250 km ile 350 km yükseklikler arasındaki kısımları alınarak kullanılsa bile bu 3B cisimlerin arasında faydalı bir kesişim olmayacaktır. Bu şartlar altında elde edilen füze rampasının 3B konumunu elde etme problemini (7 GPS alıcısı + 1 GPS uydusu) çözmek matematiksel olarak imkansızlaşır. Diğer taraftan eğer TEC in düzensiz değişiminin meydana geldiği İyonosferik yüksekliği yüksek bir duyarlılıkla bilinirse IP'lerin 3B koordinatları hesaplanabilir ve problem aşığıda anlatıldığı gibi kolayca çözülebilir. TEC'in düzensiz değişimini birden fazla GPS uydusunda belirgin ve problemsiz bir şekilde algılamak işi daha da kolaylaştırır.

Eğer düzensiz değişiminin yer aldığı yükseklik 300 km ye eşit alınırsa, filtrelenmiş TEC zaman serilerindeki minimum impulsere denk gelen algılama anları benimsenirse ve enerjinin yayılma hızı 334 m/s olarak alınırsa, füze rampasından IP'lere uzaklıklar elde edilebilir. IP'lerin koordinatları ve onlara olan uzaklıkları

göz önünde bulundurularak, füze rampasının 3B konumu en küçük kareler yöntemiyle kolayca dengelenerek hesaplanabilir.

Bu yöntem bütün 7 GPS istasyonu, 6'şar GPS istasyon setleri, 5'er GPS istasyon setleri, 4'er GPS istasyon setleri ve 3'er GPS istasyon setlerine uygulanmıştır. Bu yoğun hesaplardan açıkça görünmüş ki OVLS istasyonu bilinmeyen bir sebepten dolayı dengelemeyi bozmaktadır. Bu yüzden bu GPS istasyonuna ait veriler hesaptan çıkartılmıştır. Kalan 6 GPS istasyonu ile yapılan dengeleme, füze rampasının ilk tahmini olarak alınan LS0 konumundan yaklaşık 200 km uzaklıkta bir konum vermiştir. Bu 200 km farkı hata olarak sayılamaz çünkü füze rampasının gerçek konumu bilinmemektedir. Ayrıca fırlatılış anı olarak alınan 04:18:00 zamanı, hem 04:18:00 hem de 04:18:59 olabilir. Bu bir dakikalık belirsizliği yüzünden meydana gelen hata 20 km den büyüktür. Diğer yönden elde edilen GPS kayıtları 30 saniyelik örnekleme hızıyla çalışan GPS alıcıları tarafından kaydedilmiştir. Bu 30 saniyelik belirsizliği de ek bir 10 km'lik hataya da neden olmaktadır. Aslında Şekil 7'deki FTEC'e hızlı bir analizi, minimum impuls ile ondan sonraki maksimum impuls arasındaki zaman 2.5 dakika olduğu göstermektedir. Burada minimum impulsun alındığı gibi, ondan sonraki maksimum impulsun alınması başka bir seçenek sayılmaktadır ve gelecek araştırmacılara ışık tutabilecek nitelikte bir yaklaşım teşkil edebilir. Bu maksimum impuls alınırca, uzaklıklarda 50 km lik fark meydana gelecektir. Bütün bu faktörler, bu çalışmada elde edilen 200 km'lik farkı makul kılmaktadır. Ayrıca yukarıda bahsedilen kötü konfigürasyondan dolayı, uzaklıklarda meydana gelen küçük hatalar, elde edilen sonuçları olumsuz etkilerler (Ayan 2000). GPS ile konum belirlemedeki GPS uydularınca taşınan görev, füze rampası probleminde IP'lerce taşınmaktadır. GPS sinyalinin İyonosferin en aktif katmanının kesiti deldiği IP noktaları birbirine o kadar yakın ki, sıkıntılı bir konfigürasyona ve dolayısı ile hatalı dengeleme hesaplarına neden olurlar. Bu problem ancak birbirinden uzak iki GPS uydusu tarafından toplanan sinyallerde TEC değişimlerinin algılandığında çözülür.

Analiz, sonuç ve öneriler

GPS'in savunmadan, navigasyona haritacılıktan, bilgi sistemlerinden, inşaat şantiyelerinden, turizme kadar pek çok kullanım alanı vardır. Bu çalışmada GPS verisi yeryüzünde veya yeryüzüne yakın kaynaklardan bırakılan enerji nedeniyle İyonosferde meydana gelen düzensiz yapısal değişimleri algılamada başarıyla kullanılmıştır.

Bu kaynaklardan bir tanesi uzay mekiği tırmanışıdır. Uzay mekiği tırmanışı esnasında Bermuda Adası'nda toplanan GPS kayıtları yeniden işlenmiş, mekiğin tırmanışı yalnızca GPS verilerinde izlenebilmiştir. Bu çalışmada ulaşılan sonuçlar, uzay mekiği ile ilgili diğer yayınlar ile uyumludur.

Bu incelemenin sonuçları, GPS'in şu anki durumunun sabit GPS alıcılarının çoğunun kullandığı 30 saniye örnekleme hızı ile İyonosferde toplam elektron yoğunluğu (TEC) deki değişimlerinin yaklaşık 3×10^{14} el/m²'ye kadar belirlemeye olanak verdiğini göstermektedir. Bu değer İzmit depremi ve Minuteman II füze fırlatılışı incelemelerinde de algılanan TEC in düzensiz değişimleriyle doğrulanmıştır. Ayrıca füze uygulamasında yedi sabit GPS alıcısının tümünün sinyalleri üzerinde düzensiz ve sıçramalı değişimin büyüklüğü 6×10^{14} el/m² değerinin üzerine çıkmıştır ama başlangıç değerinin (3×10^{14} el/m²) büyüklükte algılanabilirliği doğrulanmıştır. Tırmanış durumu için filtrelenmiş TEC zaman serilerindeki belirgin değişimin iki impulsundan birincisi doğrudan, ikincisi yatay atmosfer arayüzlerince yönlendirilen iki dalga olarak yorumlanmaktadır. Bu yorumlama teoriktir. Bu tür çift impulsü sıçramalı değişim deprem veya füze fırlatılışı durumlarında görülmemiştir. Bunun makul bir nedeni olarak son iki durumda yönlendirilmiş güçlü enerji dalgalarının yokluğu ileri sürülebilir. Bu olayın iyi bir açıklaması, uzay mekiği tırmanışı durumunda enerji belli bir sürede bırakılırken, son iki örnekte enerjinin anlık olarak bırakılması olabilir. Bazı durumlarda incelemeye konu olan enerjinin ilk harekete geçtiği ana tam olarak karar vermek zordur. Diğer taraftan mekiğin tırmanışının ikinci safhasının fırlatmadan 123.8 saniye sonra başladığı bilinmektedir. Bu çalışmada

gösterilen stratejik bir füzenin fırlatılışının algılanabilme yeteneği, uzay mekiği için algılanan ikinci impulsün ikinci safhanın ateşlenmesiyle bırakılan enerji tarafından harekete geçirilirken ilk impulsün aslında fırlatmanın kendisi tarafından bırakılan enerjiyle harekete geçirildiğini teorik olarak mümkün kılmaktadır. Bu senaryo da teoriktir çünkü iki impuls yukarıda bahsedilen 123.8 saniyelik süreden çok fazla uzun olan 15 dakika ile ayrılmıştır. Bunun nedeni de enerjinin yayıldığı ortamda geciktirilmesine bağlanmalıdır. Bununla beraber bu senaryo daha fazla araştırmaya değer bir konudur.

TEC'in farklı yapısal değişimlerini algılamak için kendi şekillerini kullanabilen modele Algılama Modeli adı verilir. Uzay mekiği tırmanışı incelemesinde geliştirilen Algılama Modeli'nin deprem ve füze fırlatılışı ile harekete geçen diğer TEC değişimlerini algılamada kısmen yetersiz kaldığı görülmüştür. Üç farklı olaydaki değişik TEC değişimlerinin desenlerindeki farklılıklar çıplak gözle bile görülmektedir. Diğer taraftan Şekil 5'te gösterilen İzmit depremi TEC değişiminin deseni aşağısı yukarı gelecek şekilde ters çevrildiğinde Calais ve Minster, (1998)'de gösterilen Northridge depremininkine benzemektedir. Bu demektir ki, her desen için bağımsız bir Algılama Modeli geliştirmek iyi bir fikirdir. Böylece depremler için geliştirilen model sadece depremler tarafından açığa çıkan enerjiyi algılamada kullanılacak diye düşünülebilir. Sinyal-gürültü oranı (SNR) çizimleri Algılama Modellerinin değişimleri algılamadaki verimliliklerini ve etkinliklerini değerlendirmek için iyi bir yöntem olmuştur.

İzmit depremiyle açığa çıkan enerjinin İyonosferde algılanması deprem anından yaklaşık 25 dakika sonra olmuştur. Bu literatürde Northridge depremiyle ilgili araştırma sonuçları ile uyumludur, orada algılama Calais ve Minster (1998)'de bahsedildiği gibi deprem anından 10 ile 30 dakika sonra olmuştur. Deprem gününe denk gelen filtrelenmiş TEC zaman serilerini bir gün sonraya denk gelenlerle karşılaştırmak, görülen TEC değişimlerinin deprem tarafından harekete geçirilip geçirilmediğini doğrulamak için iyi bir düşüncedir.

Bu alışma ile ilk kez uzun menzilli balistik füzelerinin kimisi fırlatma alanından 140 km'den fazla uzakta olan istasyonlarda toplanan GPS sinyallerini işleyerek algılanabilmiş, toplam elektron içeriğini önemli ölçüde değiştiren kadar büyük enerji üretebildikleri ve bunların hiç bir kuşkuya yer bırakmayacak biçimde yine algılanabilecekleri ispatlanmıştır. Bir füze fırlatılışının algılanması hassas bir askeri operasyon iken GPS verisinin tüm sivillere açık olduğu göz önüne alınırsa ulaşılan sonucun önemi daha iyi anlaşılır. Herhangi bir füzenin bıraktığı enerji miktarının menziline bağlı olduğuna dikkat edilmelidir. Başka bir anlatımla, füzenin menzili büyüdükçe açığa çıkardığı enerji miktarı artacağından, kısa menzilli füzeler için Algılama Modelleri yeterli olmayabilirler.

Minuteman II füzesinin fırlatılışının neden olduğu TEC değişim impulslerinin değerinin tamamı ilerideki araştırmalar için eşik değer olarak kullanılabilir olan 6×10^{14} el/m² den büyüktür. Ayrıca algılamada kullanılan tam GPS istasyonları fırlatma alanının doğusunda bulunmaktadır, nkn füze ABD'nin batısındaki Pasifik Okyanusu kıyısına yakın bir rampadan fırlatılmıştır. Sabit GPS istasyonlarının tümünün doğuda toplanmış olması, bir geriden kestirme problemi için aslında arzu edilmeyen, uygun olmayan bir geometri ve kötü sayılan bir konfigürasyondur.

Füze rampasının 3B konumunu belirleme deneyi birkaç zorlukla karşılaşmıştır. Fırlatmada yayılan enerjinin sebep olduğu İyonosfer TEC değişimlerinin zaman serileri üzerinden algılanma güçlüğü, enerjinin sinyale ulaşım zamanını bulmak için gerekli veriler, fırlatma anı veya enerji yayılma yol uzunluğuna ulaşılamaması ve İyonosfer katman kalınlığının yer yer ve dış koşullara bağlı olarak değişmesi, zm aranan problemin güçlükleridir.

Diğer yönden Şekil 14'te olan Őekillerde görüldüğü gibi filtrelenmiş TEC zaman serilerindeki değişimler tek impuls ile temsil edilmezler. Bu durum enerjinin sinyale ulaşma zamanları ve dolayısı ile yollarının farklı olabileceği anlamına gelmektedir. Yayılma zamanlarını hassas olarak elde edememek te bir diğer zorluktur. Son

olarak literatürde 300 m/s ile 600 m/s arasında olduğu bildirilen enerjinin yayılım hızı bu çalışmada bulunan 334 m/s değeriyle uyumludur.

İyonosferde yapısal değişimin algılama işlemi Bölüm 4'te bahsedilen matematik algoritma ile yürütülmüştür. Bu algoritma GPS verisinin normal Şartlar altında toplanması durumunda doğru ve verimlidir. Bununla beraber bu algoritma devir kayıpları (cycle slips) veya yansıma (multi-path) olayları olduğunda filtreleme problemleriyle karşılaşır. Bu çalışmada kullanılan bütün kodlar çalışma içinde aday tarafından yazılmış olduğu ve herhangi bir gelişmiş ticari veya bilimsel yazılım kullanılmadığı için burada bahsedilmeyen bazı GPS uydularının sinyallerini TEC değişimleri için inceleme imkanı sınırlı olmuştur. İleride yapılacak işlerde bu çalışmada gösterilen ana matematik algoritmanın daha gelişmiş algoritmalarla birlikte kullanılarak sorunlu sinyal kayıtlarının arındırılması yolları aranmalıdır. Algılamada birden çok GPS uydusunun kullanılması çok yarar sağlayabilir böylece karşılaşılan bazı zorlukları zmede etkili olabilir.

Birleşmiş Milletler Genel Sekreterliği tarafından kabul edilen Kapsamlı Nükleer Test Yasaklama Anlaşması (Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty: CTBT) nın uygulanması yolunda bir denetleme yöntemi olarak ses ötesi gözlemleri arasında GPS lmeleri de önerilmiştir (Calais vd., 1998). Bu alışma buna da iyi bir kanıt oluşurmaktadır. Diğer yönden sürekli GPS istasyonlarının bu yeni görev anlayışı içinde organize olması gerekmekte ve bu çalışmada vurgulanan geometrik yapıyı güçlendirici tasarım için IGS ye görevler düşmektedir.

Kaynaklar

- Ayan, T., (2000). Jeodezik Ağların Optimizasyonu, *Ders Notları*, İT İnaaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, İstanbül.
- Calais, E. ve Minster, J. B., (1996). GPS Detection of Ionospheric Perturbations Following a Space Shuttle Ascent, *Geophysical Research Letters*, **23**, 15, 1897-1900.
- Calais, E. ve Minster, J. B., (1998). GPS, Earthquakes, the Ionosphere, and the Space Shuttle, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 105, 167-181.

- Calais, E., Minster, J. B., Hofton, M. A. ve Hedlin, M. A. H., (1998). Ionospheric Signature of Surface Mine Blasts from Global Positioning System Measurements, *Geophysical Journal International*, 132, 191-202.
- Hawarey, M., (2002). GPS Detection of Izmit Earthquake and Shape Model of Already GPS-Detected Space Shuttle Launch in 1993, *Weikko A. Heiskanen Symposium in Geodesy, 1-4 Ekim*, Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Bonilla, R., (2003). Kişisel görüşme.
- Hawarey, M., (2004). Enerjiden Kaynaklanan İyonosfer Değişimlerinin GPS İle Belirlenmesi, *Doktora Tezi*, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul, Türkiye.
- Kaplan, E. D., (1996). Understanding GPS – Principles and Applications, *An Artech House Mobile Communications Series Book*, Artech House, Boston, USA.
- Parkinson, B. W., Spilker Jr, J. J., Axelrad, P., Enge, P., (1996). Global Positioning System: Theory and Applications, **I**, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington DC, USA.
- Seeber, G., (1993). Satellite Geodesy, *Translated from the original German publication "Satellitengeodäsie"*, Walter de Gruyter, New York, USA.
- Segall, P., ve Davis, J. L., (1997). GPS Applications for Geodynamics and Earthquake Studies, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25.
- Strang, G., ve Borre, K., (1997). Linear Algebra, Geodesy and GPS, Wellesley-Cambridge Press, Wellesley, USA.
- USGS : United States Geological Survey, (1959). *State of California-Point Arguello Quadrangle 7.5 Minute Topographic Map*, Scale 1:24,000, Ministry of the Interior, Virginia, USA.
-
- NGS: National Geodetic Survey (1999). <http://www.ngs.noaa.gov>
- SOPAC: Scripps Orbit and Permanent Array Center, (2000). <http://sopac.ucsd.edu>
- United States Geological Survey (1999). <http://www.usgs.gov>
- United States Naval Observatory, (2003). <http://www.usno.navy.mil>