

## DERLEME YAZISI

**İYONOSFERDEKİ TOPLAM ELEKTRON YOĞUNLUĞU BÜYÜK DEPREMLERİN KESTİRİMİNDE KULLANILABİLİR Mİ?****Niyazi ARSLAN, Cüneyt AYDIN, Hüseyin DEMİREL***Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Yıldız-İSTANBUL***Geliş Tarihi: 12.04.2002****CAN IONOSPHERIC TOTAL ELECTRON CONTENT BE USED TO PREDICT STRONG EARTHQUAKES?****SUMMARY**

Investigations which have been performed since 1960 revealed that vertical crustal displacements due to the large magnitude earthquakes generate some waves and these waves make different changes in the ionospheric layer. These changes especially occur in the E and F layers of the ionosphere. As well known, the Total Electron Content (TEC) is a parameter to calculate the ionospheric delay of the signal of Global Positioning System (GPS). Changes in the TEC depends on the ionospheric behaviour. When the changes in the TEC are modelled accurately, changes in ionospheric layer can be monitored precisely during earthquake phenomena. Thus, assumptions related to prediction of earthquakes can be made in this way.

The purpose of this study is to explain relation between the TEC and strong earthquakes.

**ÖZET**

1960'lı yıllardan başlayarak yapılan çeşitli araştırmalar, eğim atımlı bir fay hareketi nedeniyle oluşan dalgaların büyük depremlerin oluşumu sürecinde özellikle iyonesferin E ve F tabakalarında değişimler ortaya çıkardığını göstermiştir. Bilindiği gibi Toplam Elektron Yoğunluğu (TEC), küresel konumlama sistemi (GPS) sinyallerindeki iyonesferik gecikmenin hesaplanmasına yarayan bir parametredir. TEC parametresi iyonesferik değişimlere bağlı olarak değişir. TEC'deki bu değişimler modellendirilerek, iyonesferdeki değişimle deprem arasında bir ilişki kurulabilir. Böylece depremlerin önceden kestirilmesi olanağı bulunabilir.

Bu çalışmanın amacı, iyonesferik TEC ile büyük depremler arasındaki ilişkiyi açıklamaktır.

**1. GİRİŞ**

Sismik aktivitelerin atmosfer tabakalarından biri olan iyonesferdeki elektromanyetik dalgaların genlik değişimine olan etkisi çeşitli çalışmalarda incelenmiştir [1,2,3]. Depremden birkaç gün ya da birkaç hafta önce olan kısa süreli (anlık) elektromanyetik değişimler depremin habercisi gibi görülebilmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken; önceden yapılan bu tür çalışmaların sadece belirli sayıda olan kuvvetli depremler için yapılmış olmasıdır.

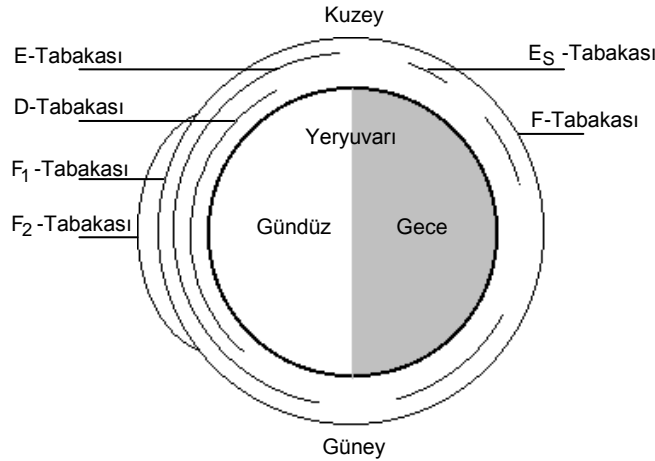
[4]'de büyüklüğü 5.0'den büyük depremlerin iyonesferin F tabakası ile ilişkisini gösteren analiz sonuçları verilmektedir. Buna göre sismik aktiviteler ile iyonesfer arasında yakın bir ilişki bulunduğu ortaya çıkmaktadır. Bu ilişkiyi incelemek için iyonesferdeki elektron yoğunluğu değişimini gösteren Toplam Elektron Yoğunluğu da (TEC) kullanılabilir.

TEC çeşitli yöntemlerle elde edilebilmektedir [1,2,4]. Bu yöntemler içerisinde en ucuz ve kullanışlısı GPS teknolojisidir. TEC dünyada çeşitli araştırma grupları tarafından farklı çalışmalarda kullanılmak üzere üretilmektedir. Bu grupların herhangi birinin kullandığı yazılım algoritması ile elde edilen TEC, depremle ilgili çalışmalarda kullanılabilir. GPS ile elde edilen TEC'in doğruluğu  $3.10^{14}$  el/m<sup>2</sup> dir. Bu değeri sinyal yolundaki değişim ile açıklamak gerekirse L<sub>1</sub> sinyal yolu uzunluğunda 5mm, L<sub>2</sub> sinyal yolu uzunluğunda 3mm şeklindedir [1]. Yeterli olabilecek bu doğruluğa karşın GPS alıcısının gürültü (noise) düzeyinin yüksek olması deprem kestirimi için yapılan çalışmalardaki analizleri oldukça güçleştirmektedir.

Bu çalışmada, iyonosferin yapısı, iyonosferde ortaya çıkan değişimler, GPS ile TEC'in elde edilişi ve depremlerle TEC'in ilişkisi incelenmiş ve TEC'in izlendiği 2 büyük depreme örnek verilmiştir.

## 2. İYONOSFER TABAKASININ YAPISI

Atmosferin çok sayıda tabakalarından biri olan iyonosfer, yeryüzünden 70 km ve 1000 km uzaklıktaki yüzeyler arasında kalan bölgedir. Bu bölgede serbest elektronlar ve pozitif yüklü atom ve moleküller bulunmaktadır [5]. İyonosfer tabakası da kendi içinde D, E, F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub>, E<sub>S</sub> olarak adlandırılan tabakalara ayrılmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 İyonosfer tabakaları [6]

D tabakasındaki iyonlaşma doğrudan güneşin etkisiyle oluşmaktadır. Buradaki iyonlaşma güneşin doğuşundan öğlene kadar geçen zaman içinde meydana gelir. E tabakasındaki iyonlaşma güneşe bağlı olarak devam eder. En fazla iyonlaşma 108 km yükseklikte olmaktadır. E bölgesinde oluşan manyetik alan değişimleri bu bölgeyi etkilemektedir. Kararlı E tabakasına ek olarak, 100-120 km yüksekliklerde gözlenen kararsız tabakalar E<sub>S</sub> tabakası olarak adlandırılır. F tabakası ise F<sub>1</sub> ve F<sub>2</sub> bölümlerine ayrılır. F<sub>1</sub> tabakasındaki değişim çoğunlukla güneşin etkisiyle oluşmaktadır. F<sub>2</sub> tabakasının davranışı oldukça düzensizdir. İyonosfer tabakaları ve özellikleri Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

**Çizelge 2.1 İyonosfer tabakaları ve özellikleri [6]**

Tabakalar	Yükseklik (km)	Elektron yoğunluğu (1/cm <sup>3</sup> )		Nötr gaz yoğunluğu (1/ cm <sup>3</sup> )
		Gece	Gündüz	
D	60-85	10 <sup>2</sup> -10 <sup>4</sup>	---	10 <sup>15</sup>
E	85-140	10 <sup>5</sup>	2.10 <sup>3</sup>	2.10 <sup>12</sup>
F <sub>1</sub>	140-200	3.10 <sup>5</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>10</sup>
F <sub>2</sub>	200-1000	5.10 <sup>5</sup>	3.10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup> -10 <sup>10</sup>

### 3. İYONOSFER TABAKASINDA MEYDANA GELEN DEĞİŞİMLER

İyonosfer ya da bunun bir parametresi olan TEC, sinyal yolu üzerindeki serbest elektronların sayısına bağlı olarak değişir. Serbest elektronların sayısı ise zaman, iklim koşulları, coğrafi enlem, güneş ve jeomanyetik değişim gibi etmenlere bağlı olarak farklı değerler alır [7]. İyonosfer tabakasında meydana gelen değişimler aşağıdaki başlıklar altında incelenmiştir.

#### 3.1. Gezici İyonosferik Bozucu Etki

Gezici iyonosferik bozucu etki (Travel ionospheric disturbance-TID), nötr atmosfer ile iyonosfer arasında meydana gelen iletişimden dolayı elektron yoğunluğunda düzensiz bir dalga ya da bozucu bir etki gibi gözükmektedir. TID, 10 km'den binlerce kilometreye kadar olan alan içerisinde etki gösterir. TID, bir akım değişimi gibi olup değişik hızlarda (100-300 km/s) hareket ederek iyonosferde aşama aşama bozucu etki meydana getirir [8]. TID, etki alanlarına göre üç gruba ayrılır:

- **Geniş Ölçekli TID:** 30 dakikadan 3 saate kadar olan zaman aralığında ve 1000 km'lik bir alan içerisinde iyonosferde meydana gelen değişimlerdir.
- **Orta Ölçekli TID:** 10 dakikadan 1 saate kadar olan zaman aralığında ve 100-200 km'lik bir alan içerisinde iyonosferde meydana gelen değişimlerdir.
- **Küçük ölçekli TID (Scintillation):** Birkaç dakika içerisinde meydana gelen anlık değişimlerdir. İyonosferdeki etki alanı 10-20 km civarındadır. Parlama etkisi (Scintillation) olarak da adlandırılan bu etki orta enlemlerde az, kutup ve ekvatorunda oldukça fazla olmaktadır [8].

#### 3.2. Güneşin Etkileri (Solar activity):

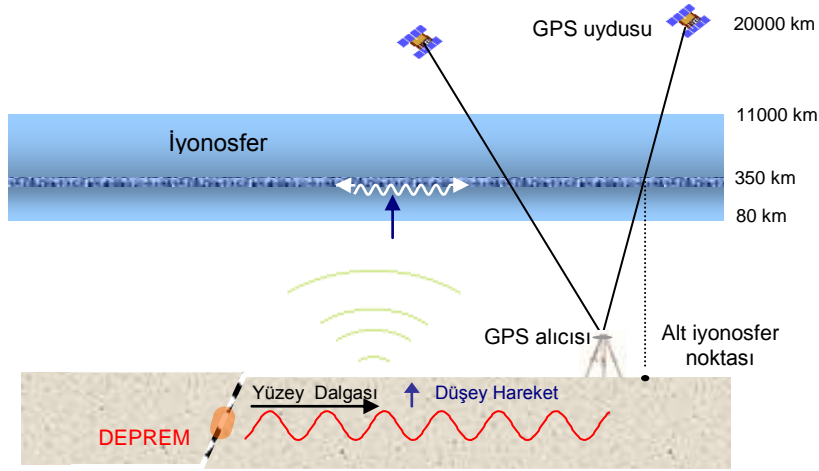
Güneşin ultraviyole dalgalarındaki değişim (solar flux), iyonosferin çeşitli bölgelerinde iyonlaşma meydana getirir [7]. Bu iyonlaşma güneş lekesi (sunspot) sayısı ile ifade edilir. Güneş lekesi sayısı iyonosferik aktivitenin 11 yılda bir en yüksek değere ulaştığını göstermektedir [9]. Güneş lekesi sayısı ile TEC ya da iyonosferin genel davranışı izlenir.

#### 3.3. Manyetik Fırtınalar

Manyetik fırtınalar güneşin parlaması sonucu kopan parçacıklar nedeniyle oluşur. Bu nedenle dünyanın manyetik alanında bir değişim meydana gelir. Bu parçacıklar aynı zamanda ek elektronlar üretirek dolaylı olarak güçlü elektrik alanı oluştururlar. Meydana gelen güçlü elektrik alanı iyonosferde değişimler meydana getirir. Bu değişim parlama etkisi şeklinde ortaya çıkar [7].

### 3.4. Deprem ve Başka Olayların Etkileri

Güçlü depremler, yerkabuğu altında meydana gelen değişimler (tektonik plaka hareketleri, iç plaka deformasyonları vb.), nükleer patlamalar, büyük volkanik patlamalar, füzelerin geçerken bıraktığı iz gibi nedenler dolayısıyla atmosferde değişimler meydana gelir [1]. Bu etmenlerden herhangi birinin gerçekleşmesi sonucunda ses ve gravite salınımları ortaya çıkar. Bu salınımlar iyonosfer tabakasına ulaşır. İyonosferde bulunan nötr atmosfer ile iyonize olmuş plazmanın birleşmesi sonucu (coupling), iyonosferin elektron yoğunluğu değişir [1]. GPS yardımıyla elde edilen TEC ile analiz edilen bu değişim deprem çalışmaları kapsamında yorumlanmaktadır [1,3].



**Şekil 3.1** Deprem nedeniyle oluşan elektromanyetik dalgaların iyonosfere etkisi

Şekil 3.1'de deprem oluşumu sürecinde meydana gelen değişim şematik olarak gösterilmiştir. Burada önemli olan nokta, depremin düşey yönde yerdeğiştirmeye sahip olmasıdır.

### 4. GPS İLE TEC ELDE ETME

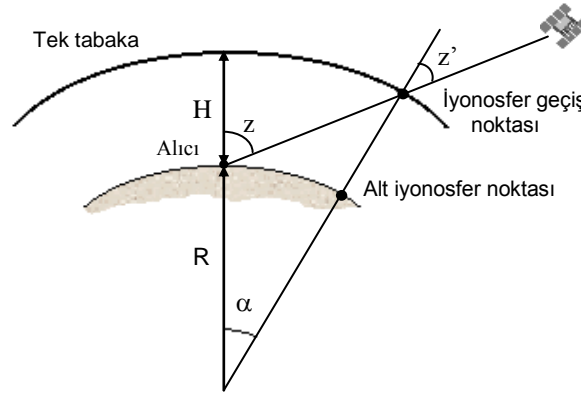
GPS ölçümleri açısından iyonosferle ilgili araştırmalar oldukça önemli olmaktadır. Bu amaçla, iyonosferik gecikmenin elde edilmesine yarayan ve iyonosferin yapısını gösteren TEC parametresinin hesaplanması gerekmektedir. TEC'in hesabında, teorik olarak,  $L_1$  ve  $L_2$  taşıyıcı faz gözlemlerinden türetilen geometri-serbest doğrusal kombinasyonu kullanılır. Bu kombinasyon içerisinde; geometriyi ifade eden, uydu ile alıcı arasındaki mesafeyi gösteren katsayılar ve troposferik gecikme değerleri bulunmamaktadır. İyonosfer tabakası geniş bir aralığı kapsadığından, bu aralığı tanımlayabilmek için tek-tabaka (single-layer) modeli kullanılır. Bu modelde maksimum yoğunluğa sahip serbest elektronların sonsuz incelikteki bir alan içinde olduğu kabul edilir [9].

Tek tabaka izdüşüm fonksiyonu  $F_1$  aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$E = \frac{I f_1^2}{\alpha} \quad (f_1 = 1.57542 \cdot 10^9 \text{ s}^{-1}) \quad (4.1)$$

$$F_1(z) = \frac{E}{E_v} = \frac{1}{\cos z}, \quad \sin z' = \frac{R}{R+H} \sin z \quad (4.2)$$

Bu eşitliklerde; E, elektron yoğunluğu;  $E_v$ , düşey elektron yoğunluğu; I, iyonosferik gecikme;  $\alpha$ , sabit katsayı ( $=4.03 \cdot 10^{17} \text{ m s}^{-2} \text{ TECU}^{-1}$ ); z ve z', zenit açıları; R, yeryuvarının ortalama yarıçapı; H, yeryuvarı yüzeyinden tek tabakaya olan yüksekliktir.



Şekil 4.1 Tek tabaka modeli

GPS uyduları iki temel taşıyıcı faz dalgası göndermektedir. Bu temel gözlemlerden ikili farklar için,

$$L_1 = \rho - I + \Delta\rho + \lambda_1 n_1 \quad (4.3)$$

$$L_2 = \rho - I + \Delta\rho + \lambda_2 n_2 \quad (4.4)$$

eşitlikleri elde edilir. Burada;  $L_1$  ve  $L_2$ , ikili fark taşıyıcı faz gözlemleri;  $\rho$ , uydudaki mesafe;  $\Delta\rho$ , troposferik gecikme;  $\lambda_1$  ve  $\lambda_2$ ,  $L_1$  ve  $L_2$  ikili fark taşıyıcı faz gözlemlerinin dalgaboyu;  $n_1$  ve  $n_2$ ,  $L_1$  ve  $L_2$  ikili fark taşıyıcı faz gözlemleri tamsayı belirsizliğidir. Bu eşitliklerden, TEC'i elde etmek için kullanılan geometri-serbest doğrusal kombinasyonu, ikili fark gözlemlerinin farkının alınmasıyla

$$L_4 = -\alpha \left( \frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) F_1(z) E(\beta, s) + B_4 \quad (4.5)$$

biçiminde elde edilir. Burada;  $L_4$ ,  $L_1 - L_2$  geometri-serbest doğrusal kombinasyonu faz gözlemi;  $f_1$ ,  $L_1$ 'in frekansı;  $f_2$ ,  $L_2$ 'nin frekansı;  $F_1(z)$ , izdüşüm fonksiyonu;  $E(\beta, s)$ ,  $\beta$

enlemi ve  $s$  güneş boylamının fonksiyonu olan düşey TEC (VEC);  $B_4$ , iyonosferik sapmadır [9].

TEC'i elde etmek için yerel ve küresel TEC modelleri kullanılır.

#### 4.1. Yerel TEC Modeli

İki boyutlu Taylor açılımı küçük alanlar için  $E_V(\beta, s)$  düşey toplam elektron yoğunluğunu belirlememizi sağlar. Deprem çalışmaları için yerel TEC modeli kullanılır.

#### 4.2. Küresel TEC Modeli

Küçük alanlarda kullanılan Taylor açılımı, küresel olarak yeryuvarını kapsayan TEC'i belirlemek için kullanılamaz. Bu amaçla, küresel harmonik açılım yaklaşımı yeryuvarının TEC'ini belirlemek için ideal bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir [10]. Bu model ile iyonosferin zamana bağlı TEC değişimi belirlenebilir. Böylece iyonosferin genel eğilimi gözlenir ya da küresel TEC modeli belirli bir gün için anlık (zamana bağlı olmadan) elde edilir.

### 5. GPS ile ELDE EDİLEN İYONOSFERİK TEC'in DEPREMLE İLİŞKİSİ

Bir depremin oluşum sürecinde yer kabuğunda çatlaklar oluşur ve bu çatlaklardan elektromanyetik dalgalar yayılır. Bu dalgalardan en önemlileri;

- **P Dalgası:** Birincil, boyuna yada basınç dalgaları olarak da adlandırılır. Yayılma hızları en fazla olan ve bu nedenle kayıtçılarda ilk görünen dalgalardır. Yer içindeki taneçiklerin titreşim hareketi yayılma doğrultusu ile aynıdır.
- **S Dalgası:** İkincil yada enine dalgalar olarak da adlandırılır. Hızları P dalgalarından daha az olduğundan kayıtçılarda ikincil olarak görülür. Titreşim hareketi yayılma doğrultusuna diktir. Bu dalgalar sıvı içinde yayılmazlar.
- **Yüzey Dalgası:** P ve S dalgalarına göre daha yavaş yayılırlar. Ancak genlikleri daha büyüktür ve yeryüzeyi boyunca hareket ederler. Rayleigh ve Love dalgası olmak üzere iki çeşidi vardır [13].

Eğim atımlı bir fay hareketi nedeniyle oluşan dalgalar yeryüzünden yukarıya doğru yayılarak iyonosferdeki elektron yoğunluğunu anlamlı bir biçimde etkiler [11]. Çok sayıda araştırmacı, iyonosferin  $F_2$  tabakasındaki değişimi bu açıdan incelemiş ve oluşan deprem nedeniyle ortaya çıkan elektrik alanının, iyonosferdeki elektron yoğunluğunun yatay yöndeki dağılımını 400 km'lik bir alanda anlamlı olarak değiştirdiğini gözlemiştir. Buradaki elektron yoğunluğu değişimi  $\pm\% 10$ 'dur [4]. Aynı zamanda depremden önce ortaya çıkan sismik etkiler iyonosfer yüksekliğinde değişime neden olmaktadır [2]. Bölüm 3'te açıklandığı gibi TEC'i etkileyen yalnızca deprem değildir; TEC'i TID, güneş, manyetik fırtınalar vb. olaylarda etkilemektedir.

TEC'in deprem ile ilişkisini doğru bir biçimde ortaya koyabilmek için söz konusu bu etkiler eksiksiz modellendirilmelidir. TEC'in bu etkilerden arındırılması işlemi çeşitli yöntemlerle yapılabilir. Bu yöntemlere medyan alma, geçiş (pass), yüksek ve düşük band filtreleri örnek olarak gösterilebilir.

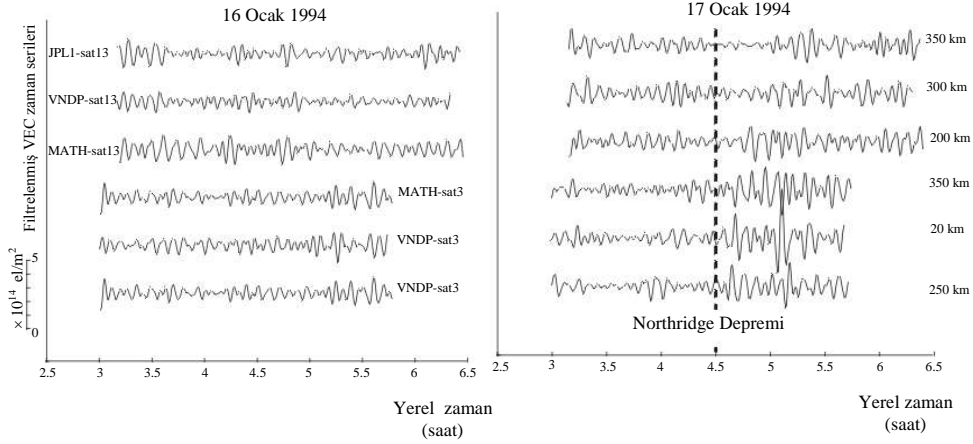
## 6. DEPREMİN İYONOSFER TABAKASINI ETKİLEDİĞİ BELİRLENEN UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Sürekli gözlem yapan GPS istasyonları ile, iki büyük depremde, iyonosferik tabakadaki değişimlerin belirlenmesi çalışmaları yapılmıştır. Bunlardan birincisi Güney Kaliforniya Northridge depremi, öteki ise Tayvan Chi-Chi depremidir [2,3].

### • Güney Kaliforniya Northridge depremindeki araştırma:

17 Ocak 1994 saat 4:31'de meydana gelen Northridge depremi 6.7 şiddetindedir. Bu depremde yerkabuğunun düşey yönde 40 cm hareket ettiği belirlenmiştir. Bu uygulamada TEC, 7 istasyondan oluşan ve sürekli gözlem yapan GPS istasyonlarından elde edilmiştir. Öncelikle depremden bir gün önce, deprem anında ve bir gün sonrasındaki mevsimsel değişimler incelenmiştir.

Bu değişim güneşin hareketine bağlı olarak değişir. Bilindiği gibi, güneşin tepede olduğu öğlen saatlerinde (12:00-14:00) TEC yüksek, güneşin doğuşundan önceki saatlerde (5:00-6:00) ise en düşük düzeylerde seyrederek. Daha sonra filtreleme tekniği uygulanarak deprem nedeniyle TEC'de oluşan değişim incelenir. Burada kullanılan filtrenin yapısı oldukça önemlidir. Çünkü TEC'deki değişimlerin bileşenlerine göre hassas bir biçimde belirlenmesi oldukça zordur. Bu uygulamada kullanılan filtre band-pass (band-geçiş) filtresidir. Filtrelemede karşılaşılan güçlüklerden biri GPS alıcısının iç gürültüsüdür. Bundan başka dikkat edilmesi gereken; TEC'i birleştirmek yerine her bir uydu ve alıcı için ayrı analizler yapmaktır. Böylece daha sağlıklı sonuçlar elde edilir.

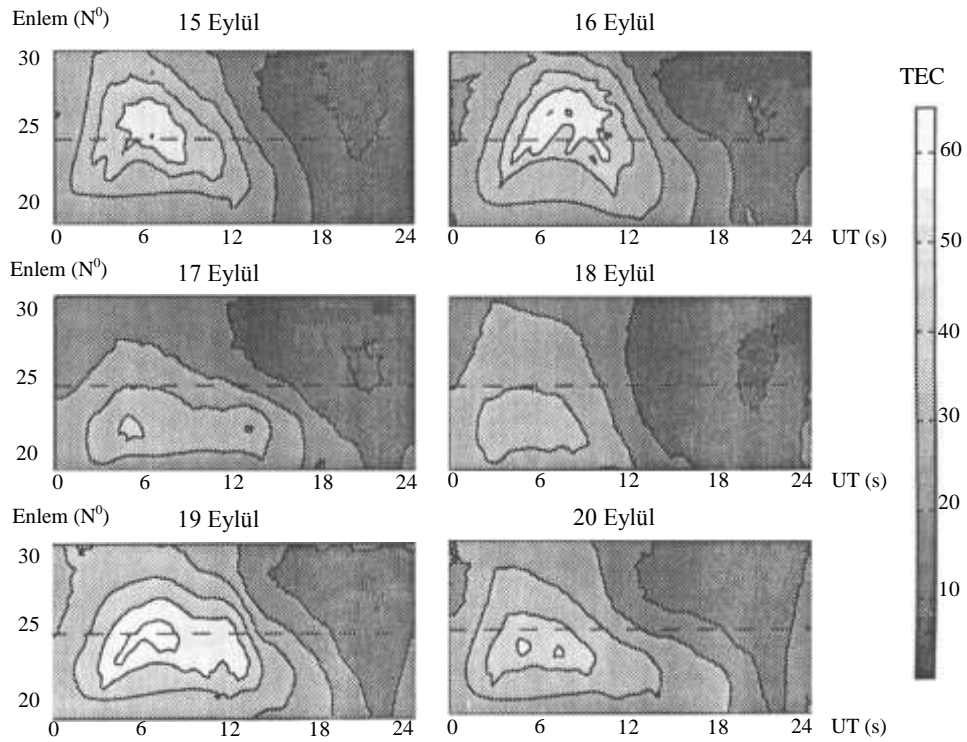


**Şekil 6.1** 16 ve 17 Ocak 1994 tarihinde elde edilen ve depremin TEC üzerindeki etkisini gösteren filtrelenmiş VEC (Düşey elektron yoğunluğu) [1]

Şekil 6.1'de 16 ve 17 Ocak 1994'te, 6 ayrı uydu ve alıcı çifti için filtrelenmiş zaman serileri verilmiştir. Buradaki bütün uydu ve alıcı çiftleri depremden sonraki 10-30 dakika içinde güçlü genlikler göstermektedir. Sinyaldeki bu değişimler, TEC'in %1 ile %3 arasında değişmesinin bir sonucudur. Fakat depremden önce TEC'deki değişimi net olarak belirlemek oldukça zordur. Bunun nedeni GPS alıcısının iç gürültü düzeyinin filtreleme duyarlılığına yakın bir değerde olmasıdır (Şekil 6.1, 16 Ocak) [1].

- **Tayvan Chi-Chi depremindeki araştırma:**

Daha farklı bir analizin kullanıldığı Chi-Chi depremi 20 Eylül 1999 tarihinde meydana gelmiş 7.7 şiddetinde bir depremdir. Bu uygulamada 13 noktadan oluşan bir GPS ağı kullanılmıştır. Her bir 30 sn.'lik epok için 65-130 (5-10 uydu için) TEC parametresi elde edilmektedir. Böylece deprem bölgesini içeren bu ağdan enlem ve boylama bağılı TEC ve enlem ve zamana bağılı TEC elde edilerek analiz yapılmıştır.



**Şekil 6.2** Depreme kadarki 6 gün için elde edilen enlem ve zamana bağılı TEC haritası[3]

Şekil 6.2 depremden önceki 6 gün içinde enlem ve zamana bağılı TEC değişimini göstermektedir. Buradaki kesik çizgiler depremin olduğu enlemi göstermektedir. Bu şekil incelendiğinde 17 ve 18 Eylülde TEC'deki tepe noktasının diğer günlere oranla % 50 oranında bir azalma gösterdiği görülmektedir. Aynı zamanda depremin merkez üssündeki TEC yoğunluğunda da bir azalma olduğu gözlenmiştir. Bu iki analiz sonucu, depremin TEC üzerinde bir etki meydana getirdiğini ortaya koymaktadır [3].

## 7. SONUÇLAR

İyonesferi tam anlamıyla modellemedeki zorluklar nedeniyle, TEC'in izlenmesi sonucu bir depremi önceden kestirmek şimdilik olanaklı görülmemektedir. Fakat yer kabuğunun



düşey yönde hareket etmesine neden olan depremlerin iyonosferde deprem anında ve öncesinde değişimler yarattığı çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir. Modelleme güçlüğü, iyonosferdeki değişimin pek çok parametreye bağlı olması, GPS'in nokta sıklığının yetersiz kalması ve GPS alıcısının iç gürültüsünden kaynaklanmaktadır. İyonosfer tabakasında meydana gelen deprem kaynaklı olmayan değişimler daha öncede açıklandığı üzere TID, güneşten kaynaklanan değişimler, manyetik fırtınalar ve mevsimsel değişimlerdir. Bu değişimlerin net olarak belirlenmesi oldukça güç olduğundan TEC, deprem analizi açısından her zaman yeterli duyarlılıkla elde edilememektedir.

Gelecekte, deformasyon ölçmeleri, elektromanyetik dalgalardaki değişimlerin ölçüldüğü ve iyonosferik TEC'in eş zamanlı gözlemlendiği çalışmaların birleştirilmesi sonucu depremle ilgili ön kestirim yapmak mümkün olabilir. Ancak, doğadaki değişimler belli sınırlar içinde belirlenebilmektedir. Bu sınırlar ölçme yöntemi, ölçme süresi, nokta sıklığı ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak değişir.

Bilindiği üzere Türkiye deprem kuşağında bulunan bir ülkedir. Northridge depremi ve Chi-Chi depremi gibi büyük depremlerde yapılan çalışmalar ülkemizdeki depremler içinde uygulanabilir. TÜBİTAK Marmara sürekli GPS izleme istasyonları (MAGNET) verileri kullanılarak analizler yapılabilir. Ülkemizde 17 Ağustos 1999'da meydana gelen İzmit depremi sağ-yönlü doğrultu atımlı faylanma mekanizmasına sahip olmasına rağmen depremin oluşum sürecinde iyonosfer tabakasında bir değişim olduğu ortaya konulmuştur [12]. Bu çalışma oldukça yenidir ve tartışmaya açıktır. Böyle bir değişimin belirlenmesi ilerideki çalışmalara ışık tutacaktır.

Sonuç olarak, TEC izlenerek yerkabuğunun düşey yönde hareket etmesine neden olan depremler tanınabilmekte, ancak önceden kestirilememektedir. Yapılan çalışmalarda bu durum açıkça görülmektedir. İyi sonuçlar alabilmek için konunun uzun bir süre araştırılması gerekmektedir.

#### KAYNAKLAR

- [1] Calais E., Minster J. B., "GPS, Earthquakes, The Ionosphere, and Space Shuttle", *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 105, 1998, 167-181.
- [2] Craig J. R., Clilverd M. A., "Modeling of Subionospheric VLF Signal Perturbations Associated with Earthquakes", *Radio Science*, Volume 34, Number 5, September-October 1999, 1177-1185.
- [3] Liu J. Y., Chen Y. I., Chuo Y. J., and Tsai H. F., "Variations of Ionospheric Total Electron Content During the Chi-Chi Earthquake", *Geophysical Research Letters*, Vol. 28 No.7, April 1,2001, 1383-1386.
- [4] Liu J. Y., Chen Y. I., Pulnits S. A., Tsai Y. B., Chuo Y. J., "Seismo-ionospheric Signatures Prior to  $M \geq 6.0$  Taiwan Earthquakes", *Geophysical Research Letters*, Vol.27, No.19, October 1, 2000, 3113-3116.
- [5] Schaer, S., "Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the GPS", Ph.D Thesis, Universitat Bern, 1999.
- [6] Wild, U., "Ionosphere and Geodetic Satellite Systems; Permanent GPS Tracking Data for Modelling and Monitoring", 1994.

- [7] Parkinson B. W., Spilker J. J., "Global Positioning Systems: Theory and Applications", Vol.1, 1996, 11-212.
- [8] Warnant R., Pottiaux E., "The Increase of the Ionospheric Activity as Measured by GPS", Earth Planets Space Vol.52, 2000, 1055-1060.
- [9] Hugentobler U., Schaer S., Fridez P., et.al., "Bernese GPS Software Version 4.2", Astronomical Institute University of Berne, 2001, 160-163, 205-221.
- [10] Schaer S., Beutler, G., Mervart, L., et.al., "Global and Regional Ionosphere Model Using the GPS Double Difference Phase Observable", in the Proceeding of IGS Workshop on Special Topics and New Directions, Germany, 1995.
- [11] Artru J., Lognonne P., "Normal Modes Modelling of Post-Seismic Ionospheric Oscillations", Geophysical Research Letters, Vol.28, No.4, February 15, 2001, 697-700.
- [12] Hawarey M., "GPS Detection of Izmit Earthquake and Shape Model of already GPS-Detected Space Shuttle Launch in 1993", Weikko A. Heiskanen Symposium in Geodesy, The Ohio State University, October 1-4, 2002.
- [13] [www.koeri.boun.edu.tr/sismo/sss\\_tr.htm](http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/sss_tr.htm), "Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü", İnternet Sayfası