

İYONOSFER F2 TABAKASI PARAMETRELERİNİN ENİYİLEME YOLU İLE IRI MODELİ VE IONOLAB TEİ KESTİRİMLERİ KULLANILARAK BELİRLENMESİ

DETERMINING F2 LAYER PARAMETERS VIA OPTIMIZATION USING IRI MODEL AND IONOLAB TEC ESTIMATIONS

Oktay ŞAHİN¹, Umut SEZEN², Feza ARIKAN³, Orhan ARIKAN⁴

¹ Aselsan A.Ş.
oksahin@aselsan.com.tr

² Elektrik ve Elektronik Müh. Böl.
Hacettepe Üniversitesi
u.sezen@ee.hacettepe.edu.tr

³ Elektrik ve Elektronik Müh. Böl.
Hacettepe Üniversitesi
arikan@hacettepe.edu.tr

⁴ Elektrik ve Elektronik Müh. Böl.
Bilkent Üniversitesi
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

ÖZETÇE

Yüksek frekans (HF) dalgalarının yayılmasında en önemli tabakanın iyonosferin F2 tabakası olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, Uluslararası Referans İyonosfer (IRI) modelinin parametrelerinden olan F2 tabakasının yüksekliği (HmF2) ve kritik frekansının (FoF2) iyonosferin Toplam Elektron İçeriği (TEİ) yapısı ile ilintisi parametrik tanım aralığında incelenmiş ve bu iki parametre IONOLAB TEİ kestirimleri de kullanılarak eniyilemeye tabi tutulmuştur. Eniyileme algoritmasının performansı, günlük (24 saat) ile saatlik TEİ verilerinin işlenmesi durumları için ayrı ayrı incelenmiştir. Saatlik veri kullanılmasının çok daha düşük hatalı sonuçlar ürettiği gözlemlenmiştir. Bu eniyileme yöntemi kullanılarak, F2 tabakasının yüksekliği ve kritik frekansı, Türkiye de dahil olmak üzere yüksek ve alçak enlemdeki ülkelerde aynı sakin gün için elde edilmiştir. Sonuçlar iyonosonda verileriyle karşılaştırılmış ve hata normunun kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür. Bu şekilde iyonosferin daha gerçekçi elektriksel yapısına ulaşılabilmiştir.

ABSTRACT

We know that F2 layer of the ionosphere is most important layer in the propagation of high frequency (HF) waves. In this study, The relation of the height (HmF2) and the critical frequency (FoF2) of F2 layer—among the parameters of the International Reference Ionosphere (IRI) model—to the Total Electron Content (TEC) structure of ionosphere is investigated within their defined parametric range. These two parameters are then optimized using IONOLAB TEC estimations. Performance of the optimization algorithm is examined separately for the cases of processing daily (24-hour) and hourly TEC data. It is observed that using hourly data produce results with much smaller errors. By using this optimization method, the height and the critical frequency of F2 layer are obtained for countries located on low and high latitudes including Turkey for the same quite day. Results are compared with ionosonde data and it is observed that error norms were in an acceptable range. By this way it is attained the more realistic electrical structure of ionosphere.

1. GİRİŞ

İyonosfer, elektriksel olarak nötr bir ortamda genellikle eşit miktarda serbest elektron ve pozitif iyon içeren, kısa dalga (KD) ve uydu haberleşmesinin en önemli belirleyicilerinden olan ve atmosferin 60 ile 1000 km yükseklikleri arasında yer alan katmandır. İyonlaşma ve elektron yoğunluğu konuma, zamana, güneşe, jeomanyetik ve sismik hareketliliklere göre değişim gösterir. Yapısını karakterize eden birçok parametre elektron yoğunluğuna bağlı fonksiyonlardır. Bunlardan biri de Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. TEİ, 1 m² kesitli bir silindir boyunca toplam serbest elektron miktarıdır. Birimi TECU olup 1 TECU, 10¹⁶ elektron /m²'dir. TEİ kestirimi için yer tabanlı ve uydu tabanlı çeşitli teknikler bulunmaktadır. Bunların içinde en kullanışlı olanı Yerkesel Konumlama Sistemi (GPS)'dir [1-2].

Güneş aktivitelerinin iyonlaşmayı etkilemesi nedeniyle iyonosfer, farklı iyonik özelliklere sahip tabakalardan oluşur. Bu tabakalar; D, E ve F katmanlarıdır. Güneş aktivitelerinden çok etkilendiği için iyonik yapısı değişen F2 tabakasının, yüksek frekans (HF) haberleşmesindeki önemi nedeniyle ayrıca incelenmesi gerekmektedir [3].

Dünden bugüne iyonosferdeki değişiklikleri ve etkilerini incelemek amaçlı teorik ve ampirik olmak üzere çeşitli modeller geliştirilerek iyonosferin gizemi çözülmeye çalışılmıştır. Bunlardan en öne çıkan ve yaygın olarak kullanılan Uluslararası Referans İyonosfer (IRI) modelidir. IRI modeli, Uzay Araştırma Komitesi (COSPAR) ve Uluslararası Radyo Bilimi Birliği (URSI) sponsorluğunda geliştirilmiştir. IRI modeli belirli bir konum ve zaman için elektron yoğunluğu, elektron içeriği, elektron sıcaklığı, iyon sıcaklığı ve iyon bileşimi kestirimleri üretebilmektedir (www.iri.org).

IONOLAB TEİ yöntemiyle işlenmiş uydu verilerinden elde edilen TEİ kestirimlerinin hata sinyalinin üretilebilmesi amacıyla model TEİ kestirim çıktısı ile birlikte parametrelerin güncelleyici faktörü olarak kullanılabilmesi IRI modelinin güvenilirliğinin sınanması açısından da önem arz etmektedir. Dolayısıyla, bu çalışmada IRI modelini dögüsel bir yapı

içerisine oturtup IONOLAB TEİ kestirimleri ile arasındaki hata sinyalini oluşturmak ve model çıktılarını ve girdilerini kullanarak F2 tabakasının iletimle ilgili parametrelerini eniyileme ile elde etmek amaçlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan TEİ kestirimlerini üreten IONOLAB TEİ yöntemi Bölüm 2’de, IRI modeli Bölüm 3’te ve F2 katmanı parametrelerini belirleyen eniyileme yöntemi Bölüm 4’te anlatılmıştır. Bölüm 5’te sonuçlar detaylandırılmış ve kestirimler ionosonda verisi ile karşılaştırılmıştır. Son değerlendirmelere de Bölüm 6’da yer verilmiştir.

2. IONOLAB YÖNTEMİYLE TEİ KESTİRİMİ

IGS analiz merkezleri TEİ kestirimleri üretebilmesine rağmen, bu kestirimlerin zamansal çözünürlüğü düşüktür veya kestirimler ampirik veriler üzerine kuruludur. IONOLAB (www.ionolab.org) kestirim yöntemi ile Dünya üzerindeki herhangi bir GPS alıcı istasyonu ve zaman dilimi için TEİ kestirimi, alıcının en alt başucu açısı olan 10° üzerindeki tüm uyduların verileri kullanılarak ve alıcıların sınırı olan 30 saniye zaman çözünürlüğünde “Düzgünleştirilmiş En Küçük Kareler” yöntemi ile yapılabilmektedir [4]. Bu yöntemin IGS merkezlerinin ve IRI Modelinin kestirimlerine göre daha yüksek zaman ve konum çözünürlüğünde başarılı sonuçlar elde ettiği görülmüştür [5]. TEİ değerleri elde edilirken uydu pozisyonlarına göre ağırlıklandırılarak verilerdeki çoklu yol etkilerinden kaynaklanan bozulmalar azaltılmaktadır [6-7]. IONOLAB TEİ kestirimleri, IRI modelinin Bölüm 3’te belirtilen parametrelerinin eniyilenmesi esnasında ölçüm verisi olarak kullanılacaktır.

3. IRI MODELİ

IRI modeli [8] değişik ölçüm kaynaklarından elde edilen verilerle güncellenen ampirik bir modeldir. Bu çalışmada kullanılan IRI modeli (IRI-Plas), ek olarak 20000 Km yüksekliğe kadar olan plazmaküreyi de hesaplamalarına dahil etmektedir [9]. Modelin giriş parametrelerinin bir kısmı güncel veriler, bir kısmı hesaplama yöntemlerine karar verme mekanizmasının seçim parametreleri ve diğer kısmı da katman karakteristiklerini içeren eniyilenebilir parametrelerdir. IRI modelinin çıktısı parametreler ile belirlenen ionosfer modeline göre elde edilen TEİ kestirimidir (IRI modelinden her katman için ayrı TEİ kestirim çıktısı alınabilmektedir) [8].

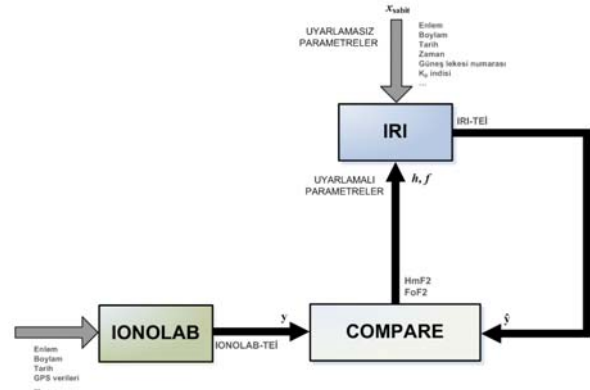
$$\hat{y} = \text{iri}(h, f, \mathbf{x}_{\text{sabit}}) \quad (1)$$

Burada h ionosferin F2 katmanının yüksekliğini, f ionosferin F2 katmanının kritik frekansını, ve $\mathbf{x}_{\text{sabit}}$ vektörü ise hedef enlem, boylam, tarih, zaman, günlük güneş lekesi ve K_p indisi gibi eniyilemeye girmeyen parametreleri ifade etmektedir. Bu parametrelerden güneş lekesi ve K_p indisi kullanıcıdan bağımsız olarak veri tabanından alınan günlük verilerdir. Giriş parametrelerine göre hesaplanan ve IRI modelinin çıktısı olan TEİ kestirimi ise \hat{y} ile ifade edilmiştir.

4. F2 KATMANI PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Gündüz bütün ionosfer katmanları oluşurken, gece olup güneşin iyonlaştırma etkisi ortadan kalkınca F2 katmanının altında kalan bütün katmanlar yok olur. Azalan elektron yoğunluğuna rağmen yalnızca F2 katmanı kalır. Dolayısıyla uzun mesafeli yüksek frekans iletişiminde F2 katmanı büyük önem arz eder. F2 tabakasını karakterize eden başlıca iki iletişim parametresi HmF2 kritik yüksekliği ve FoF2 kritik frekansdır. Çünkü ionosfer, iyonik yapısı gereği kritik bir frekans değerinin üzerindeki sinyalleri geçirirken, düşük frekanslı sinyallerin kırılmasına neden olduğu için uzun mesafe iletişiminde ve uydu iletişiminde bu frekans değeri (FoF2) önemlidir. Aynı şekilde bu kritik frekans değeriyle sinyalin gidebileceği maksimum yüksekliğin de (HmF2) bilinmesi sağlıklı kestirim yapabilmemiz için gereklidir. IRI modeli kullandığı veri seti ile kritik frekans ve yükseklik analizi yapar ve bulduğu değerleri elektron yoğunluğu hesabında kullanır, TEİ kestirimi yapar. Olması gereken TEİ değerlerinden ne kadar uzak olduğumuzu bilirsek ve HmF2 ve FoF2 eniyilmesi yapabilirsek ionosferin yapısını oluşturmada büyük bir adım atmış oluruz.

Bunun için, IONOLAB TEİ verilerini (y) gözlem verileri olarak alıp IRI modelinin çıktısı olan model TEİ kestirimi (\hat{y}) ile arasındaki farkı minimize edecek bir eniyileme döngüsü kurmamız yeterli olacaktır. Bu amaçla oluşturulan eniyileme döngüsü Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1: IRI Döngüsel Optimizasyon Modeli

Gözlem TEİ değerleri ile model TEİ değerleri arasındaki hata vektörünü e ile ifade edersek,

$$e = y - \hat{y} \quad (2)$$

döngüsel model içerisinde kestirim hatası normunu $\|e\|$ minimize edecek şekilde h ve f parametrelerini eniyileyerek en uygun ionosfer modelini oluşturmuş oluruz.

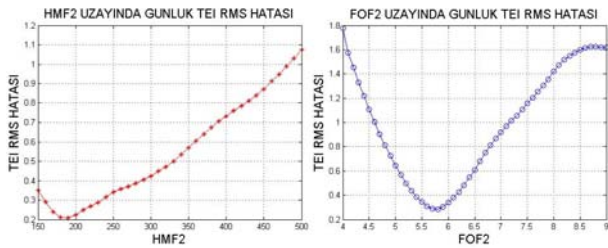
Kestirim hatası normunu saatlik veya günlük vektör seti ($\|e_{\text{saatlik}}\|$ veya $\|e_{\text{günlük}}\|$) olarak minimize ederek HmF2 kritik yükseklik (Km) ve FoF2 kritik frekans (Mhz) parametrelerinin saatlik veya günlük ortalama değerlerini elde etmiş oluruz.

IRI modelinin kullanacağı eniyileme modeline karar vermek için HmF2 ve FoF2 parametre uzayının oluşturacağı model TEİ kestirimi hata normu yüzeyinin incelenmesi gerekmektedir. Bütün parametre tanım aralığında hata norm karakteristiğinin global ve lokal minimumların sayısına ve konumuna göre bir eniyileme algoritması ilklendirilmiş ve çalıştırılmıştır. Bu incelemeler sonucunda eniyileme metodu olarak “Doğrusal Olmayan En Küçük Kareler” yönteminin fazlasıyla yeterli olacağı görülmüştür. TEİ kestirim hata vektörü günlük ($\|e_{günlük}\|$) ve saatlik ($\|e_{saatlik}\|$) olmak üzere farklı zaman aralıkları içinde minimize edilmiş ve buna göre günlük ve saatlik ortalama HmF2 ve FoF2 değerleri eniyileme döngüsüyle elde edilmiştir.

5. ALGORİTMANIN SINANMASI

İlk örnek olarak, sakin gün olan “15 Ekim 2008” ve Türkiye’de Ankara’da yer alan “ankr” IGS istasyonu alınmıştır.

HmF2 tanım aralığı olan 150-500 km aralığında 10 km’lik adımlarla ve FoF2 tanım aralığı olan 4-9 Mhz aralığında 0.1 Mhz’lik adımlarla olmak üzere ayrı ayrı günlük ortalama kareler kökü (RMS) hata karakteristiği çıkartılmış ve sonuçlar Şekil 2’de gösterilmiştir. HmF2’ye bağlı hata grafiği oluşturulurken FoF2 için ortalama bir değer olan 6 Mhz değeri sabit alınmıştır. Benzer şekilde FoF2’ye bağlı hata grafiği oluşturulurken HmF2 için ortalama bir değer olan 250 Km değeri sabit alınmıştır. HmF2 ve FoF2 parametre setindeki TEİ hata karakteristikleri incelendiğinde parametrik tanım aralıklarında lokal minimum noktalarının olmadığı ve dolayısıyla minimumların global minimum olduğu görülmektedir.

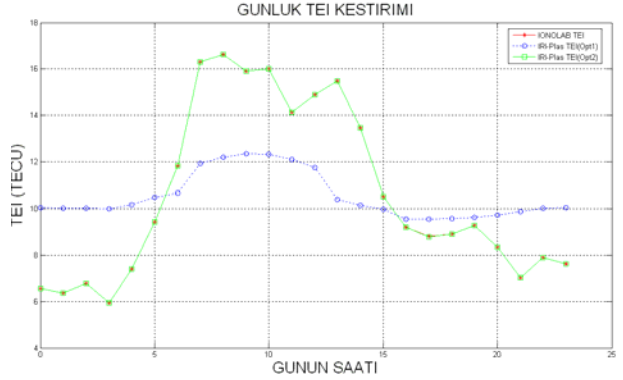


Şekil 2: Ankara 15 Ekim 2008 sakin günü için a) HmF2, b) FoF2 parametre setinde TEİ hata normu incelemesi

Bu nedenle, eniyileme metodu olarak “Doğrusal Olmayan En Küçük Kareler” yöntemi seçilmiştir. Döngü içerisinde eniyileme parametrelerinin başlangıç değerleri olarak IONOLAB TEİ kestirimi (y) olmadan IRI’in hesapladığı değerler kullanılmıştır.

Daha sonraki inceleme konusu ise kestirim hatası normunu $\|e_{saatlik}\|$ ya da $\|e_{günlük}\|$ olarak minimize etmenin eniyileme performansına ve sonuçlarına olan etkileridir. Şekil 3’te IONOLAB TEİ kestirim vektörü y kırmızı yuvarlak, günlük uyduruma göre elde edilen IRI TEİ kestirimi yeşil kare ve

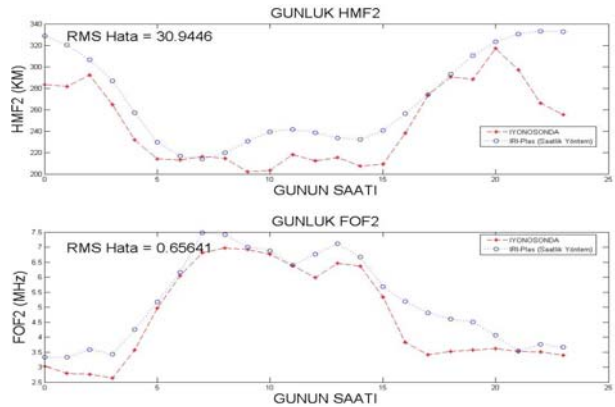
saatlik uyduruma göre elde edilen IRI TEİ kestirimi mavi yuvarlak ile gösterilmiştir.



Şekil 3: TEİ kestirimi sonuçları (15 Ekim 2008, Ankara)

Seçili gün ve alıcı istasyonu için, sırasıyla $\|e_{günlük}\|$ ve $\|e_{saatlik}\|$ hata vektörlerine göre parametre eniyilemesi sonucunda oluşan günlük TEİ kestirimlerinin RMS hata değerleri sırasıyla 2.89 TECU ve $1.84e-4$ TECU olarak bulunmuştur. Şekil 3’te görüldüğü gibi IONOLAB kestirimleri ile saatlik veri işlenerek yapılan IRI kestirimleri birbir örtüşmekte iken, günlük veriyi birlikte kullanarak yapılan IRI kestirimlerinde yüksek oranda bir hata oluşmaktadır. Bu nedenle saatlik eniyileme yapılmasının uygun olduğu ve döngüsel modelin saatlik veriyi işleyecek şekilde oluşturulması uygundur. Sonraki analizler saatlik veri eniyilemesi çıktılarına göre yapılmıştır ve verilen saatlik hata normunun $\|e_{saatlik}\|$ minimize edilmesi sonucu elde edilen parametreler kullanılarak üretilen 24 saatlik IRI modeli TEİ kestirimleridir.

Ankara ile aynı enlemdeki en yakın ionosonda Atina (AT138) ionosondası olduğu için karşılaştırmalı sonuçlar için bu istasyon kullanılmıştır. Buna göre 15 Ekim 2008 tarihi için Ankara için elde edilen HmF2 ve FoF2 değerlerinin, Atina ionosonda verileri ile karşılaştırılması Şekil 4’te verilmiştir. Şekilde ionosonda verileri kırmızı, eniyileme sonucu elde edilen HmF2 ve FoF2 değerleri de mavi ile gösterilmiştir.

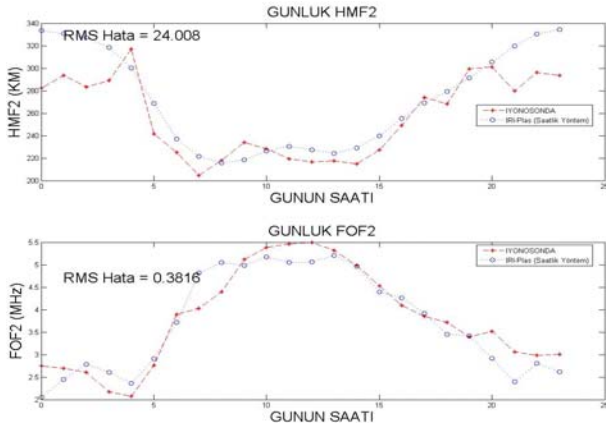


Şekil 4: ankr - AT138 a) HmF2, b) FOF2 karşılaştırması

Burada RMS hatalar HmF2 için 30.95 Km ve FoF2 için de 0.66 MHz olarak bulunmuştur. Grafiklerin benzerlik göstermesine rağmen hataların büyük olmasının temel nedeni

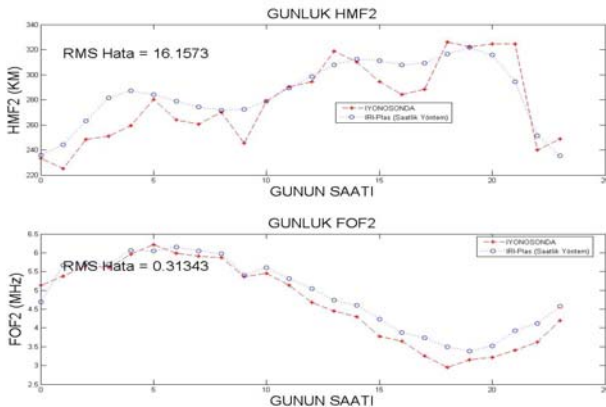
Ankara'da bir ionosonda olmaması nedeniyle Atina'daki ionosonda verilerinin kullanılmasdır.

Yüksek enlem bölgesinde örnek olarak Polonya'daki "wroc" (Wroclaw) IGS istasyonu ve bu istasyona yakın olan Juliusruh/Rugen (JR055) ionosondası seçilmiştir. Şekil 5'te 15 Ekim 2008 günü için elde edilen HmF2 ve FoF2 değerleri ile ionosonda verilerinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekilde ionosonda verileri kırmızı, eniyileme sonucu elde edilen HmF2 ve FoF2 değerleri de mavi ile gösterilmiştir. Yine bu durumda da kestirimlerin birbiri ile oldukça uyumlu olduğu gözükmektedir. RMS hatalar ise HmF2 için 24.01 Km ve FoF2 için de 0.38 MHz olarak bulunmuştur.



Şekil 5: wroc - JR055 a) HmF2, b) FOF2 karşılaştırması

Alçak enlem bölgesinde ise örnek olarak Avustralya'daki "karr" (Karratha) IGS istasyonu ve bu istasyona yakın olan Learmonth (LM42B) ionosondası kullanılmıştır. Şekil 6'da elde edilen HmF2 ve FoF2 değerleri ile ionosonda verilerinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekilde ionosonda verileri kırmızı, eniyileme sonucu elde edilen HmF2 ve FoF2 değerleri de mavi ile gösterilmiştir. Grafiklerin birbiri ile yine oldukça uyumlu olduğu gözükmektedir. RMS hatalar ise HmF2 için 16.16 Km ve FoF2 için de 0.31 MHz olarak bulunmuştur.



Şekil 6: karr - LM42B a) HmF2, b) FOF2 karşılaştırması

6. SONUÇLAR

Sonuç olarak IRI ve TEİ kestirimleri döngüsel model içerisinde işlenerek HmF2 ve FoF2 parametreleri düşük hata

oranıyla eniyilenebilmektedir. Farklı enlemlerdeki yerler için alınan sonuçlar, oluşturulan eniyileme algoritmasının düzgün çalıştığını göstermektedir. Eniyileme algoritması ile bulunan HmF2 ve FoF2 model parametreleri ionosonda verileriyle (www.spidr.ngdc.noaa.gov/spidr) karşılaştırılmış ve oluşun hataların kabul edilebilir büyüklükte olduğu sonucuna varılmıştır. HmF2 ve FoF2 için karşılaştırmalı sonuçlar incelendiğinde kestirim hatasının gece saatlerinde gündüze göre daha büyük olduğu, ama gün genelinde ionosonda verileriyle kestirimlerin örtüştüğü görülmektedir. Bu çalışma ile literatürdeki daha önceki çalışmalara getirilen yeniliklerden bir tanesi de kullandığı IRI modelinde 20000 Km'ye kadar çıkılabilmektedir. Plazma tabakası için elektron içeriği ölçeklemesinde IONOLAB TEİ yöntemiyle kestirilen TEİ değerleri kullanılarak bugüne kadar yapılmamış olan HmF2 ve FoF2 parametre eniyilemesi yapılabilmiş ve ionosfer yapısının en gerçekçi modellenmesine biraz daha yaklaşılmıştır. Türkiye üzerine daha geniş çapta yerleştirilmiş YKS istasyonu ağından kestirilecek TEİ verileri ile Türkiye üzerindeki ionosferin daha iyi bir modeli oluşturulabilir ve sürekli güncellenen veriler ışığında kalıcı, güncel ve Türkiye'ye özel istatistiksel bir model oluşturulabilir.

Teşekkür

Bu çalışma, TUBITAK EEEAG 109E055 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

7. KAYNAKÇA

- [1] Arıkan, F., Erol, C.B. and Arıkan, O., "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 108(A12): 1469-1480, 2003.
- [2] Nayır, H., "Yerküresel Konumlama Sistemi İşaretleri kullanarak İyonosfer Toplam Elektron İçeriği Kestirimi", *Hacettepe Ü. Ele-Elo. Müh. Yüksek Lisans Tezi*, 2007.
- [3] Kolawole, M. O., *Radar Systems, Peak Detection and Tracking*, Oxford, UK: Newnes, 2002.
- [4] Arıkan, F., Nayır, H., Sezen, U. and Arıkan, O., "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC", *Radio Science*, 43: RS4004, 2008
- [5] Uğurlu, O., "IONOLAB Yöntemi ile WEB tabanlı TEİ Hesaplanması ve Sunumu", *Hacettepe Ü. Ele-Elo. Müh. Yüksek Lisans Tezi*, 2007.
- [6] Arıkan, F., Sezen, U., Arıkan, O., Uğurlu, O., Nayır, H., "SpaceWeather Activities of IONOLAB Group: IONOLAB-TEC", *Geophysical Research Abstracts*, 11:EGU2009-5188, 2009.
- [7] Nayır, H., Arıkan, F., Arıkan, O. and Erol, C.B., "Total electron content estimation with Reg-Est", *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 112: A11313, 2007.
- [8] D. Bilitza (ed.), *International Reference Ionosphere 1990*, NSSDC 90-22, Greenbelt, Maryland, 1990.
- [9] T.L. Gulyaeva, "Storm time behavior of topside scale height inferred from the ionosphere-plasmasphere model driven by the F2 layer peak and GPS-TEC observations," *Advances in Space Research*, 2010 doi:10.1016/j.asr.2010.10.025, 2010.