

# İyonkürede 3 Boyutlu Elektron Yoğunluğu Kestirimi

## 3D Electron Density Estimation in the Ionosphere

Hakan Tuna, Orhan Arıkan

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Bilkent Üniversitesi

htuna@bilkent.edu.tr, oarikan@ee.bilkent.edu.tr

Feza Arıkan

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Hacettepe Üniversitesi

arikan@hacettepe.edu.tr

**Özetçe** —İyonküre zaman ve uzayda değişkenlik gösteren bir iyon dağılımına sahiptir. İyonkürenin yapısını modelleyebilmek amacıyla fiziksel ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla geliştirilmiş en güncel model International Reference Ionosphere extended to Plasmasphere (IRI-Plas) modelidir. Ancak IRI-Plas iyonkürenin yapısıyla ilgili bir model sunmakta ve anlık iyonküre uyumu mühendislik uygulamalarının gerektirdiği hassasiyette olamamaktadır. Anlık iyonkürenin durumuyla ilgili önemli bir bilgi kaynağı iyonküreden etkilenen GPS sinyalleridir. Bu çalışmada, iyonkürenin anlık durumuna ait ölçümlere ve beklenen fiziksel yapısına en uyumlu iyonkürenin oluşturulması bir eniyileme problemi olarak ortaya konulmuş ve parçacık sürüsü optimizasyonu tekniği kullanılarak çözülmüştür. Türkiye üzerindeki iyonkürenin yapısı geliştirilen eniyileme tekniği kullanılarak incelenmiş ve GPS sinyallerinden elde edilen anlık iyonküre ölçümlerinin önemi gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler**—İyonküre, 3 boyutlu elektron yoğunluğu kestirimi, IRI-Plas, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

**Abstract**—Ionosphere has ion distribution which is variable in space and time. There have been physical and empirical studies for modeling the ionosphere. International Reference Ionosphere extended to Plasmasphere (IRI-Plas) is the most recent model developed for this purpose. However, IRI-Plas presents a model about the ionosphere and its compliance with the instantaneous state of the ionosphere does not provide the accuracy needed for engineering purposes. One of the important information sources about the instantaneous state of the ionosphere is GPS signals. In this study, constructing the ionosphere which is compatible with both the instantaneous ionosphere measurements and the physical structure of the ionosphere is presented as an optimization problem, and solved by using the particle swarm optimization technique. The ionosphere over Turkey is investigated by using the proposed optimization method and the importance of the instantaneous ionosphere measurements obtained from GPS signals is demonstrated.

**Keywords**—Ionosphere, 3D Electron Density Estimation, IRI-Plas, Particle Swarm Optimization

### I. GİRİŞ

İyonküre, yeryüzünden yaklaşık 90 km yükseklikte başlayıp 1000 km yüksekliğe kadar devam eden, ve büyük ölçüde güneş ışınlarının etkisiyle iyonlaşmış bir atmosfer katmanıdır. İyonküre, radyo dalgaları üzerindeki etkileri sebebiyle uydu haberleşme sistemlerinin ve uydu konumlama sistemlerinin başarımında büyük bir öneme sahiptir.

Güneş'in etkisiyle iyonkürede bulunan moleküller iyonize olarak ortamda serbest elektronların oluşmasına neden olurlar. İyonkürenin yapısı içeriğindeki elektronların zaman ve uzaydaki dağılımıyla tanımlanır. Atmosferde yüksekliğe bağlı olarak basıncın değişmesi, farklı gazların yoğunluğunun ve bu gazların Güneş ışınları ile etkileşiminin değişmesi, geomanyetik etkiler ve Güneş fırtınaları gibi etkilere bağlı olarak iyonküredeki elektron yoğunluğu dağılımı oldukça karmaşık bir yapı sergilemektedir.

International Reference Ionosphere (IRI), fiziksel ve deneysel bir iyonküre modelidir [1]. Committee on Space Research (COSPAR) ve International Union of Radio Science (URSI) tarafından desteklenen IRI modeli, her sene yeni ölçümlerle güncellenerek geliştirilmektedir. IRI modeli, dünya üzerinde verilen herhangi bir konum ve zaman için, 50 km ile 2000 km yükseklikleri arasında dikey elektron yoğunluğu dağılımı tahmini üretebilmektedir. International Reference Ionosphere extended to Plasmasphere (IRI-Plas) modeli ise yükseklik sınırını 20,000 km'ye kadar çıkartarak iyonküre ile beraber plazmaküreyi de modelleyebilen bir IRI modelidir [2]. Ancak, IRI-Plas modelinden elde edilen dikey elektron yoğunluğu dağılımı tahminleri GPS sistemleri aracılığı ile yapılan anlık ölçümlerle yeterince uyumlu sonuçlar verememektedir.

GPS sistemleri, GPS uyduları ile alıcı istasyonlar arasındaki rotada bulunan Toplam Elektron İçeriğinin (TEİ) oldukça güvenilir bir şekilde tahmin edilmesine olanak sağlamaktadır. GPS sistemleri devamlı olarak ölçüm yapabildiği ve maliyet açısından da oldukça uygun olduğu için TEİ ölçümlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Genellikle GPS sistemlerinden elde edilen eğik TEİ ölçümleri geometrik bir düzeltme yardımı ile dikey TEİ değerlerine çevrilerek 2 boyutlu TEİ haritaları elde edilmesinde kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, iyonküre ile ilgili anlık ölçümlere ve iyonkürenin fiziksel yapısına en uyumlu iyonkürenin oluşturulması bir eniyileme problemi olarak ortaya konulmuştur. Önerilen yöntemde, IRI-Plas modelinde kullanılan varsayılan iyonküre parametrelerinin Türkiye üzerinde oluşturduğu 2 boyutlu sanal yüzeyin üzerine, 3 parametre ile ifade edilebilen 2 boyutlu bir sapma yüzeyi eklenmektedir. Bu 3 parametre, toplam yüzeyden elde edilen parametrelerin IRI-Plas modeline girdi olarak verilmesiyle hesaplanan 3 boyutlu elektron yoğunluğu dağılımı, gerçek ölçümlerle uyumlu hale getirilecek şekilde eniyileştirilmektedir. Eniyileştirme yöntemi olarak rassal bir yöntem olan Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) kullanılmaktadır [3]. Elde edilen sonuçlar, hem gerçek GPS

ölçümleri ile hem de IRI-Plas modeli ile uyumlu gürbüz bir 3 boyutlu elektron yoğunluğu dağılımı kestirimi sağlamaktadır.

## II. GPS ÖLÇÜMLERİ

İyonkürenin, GPS sinyallerinin aktarımında neden olduğu gecikme, GPS bazlı konumlama sistemlerinin performansı üzerinde oldukça kötü bir etkiye sahiptir. Bu etkinin hesaplanarak konumlama sistemlerinde gerekli düzeltmelerin yapılabilmesi amacıyla, GPS uyduları 2 farklı frekans bandında yayın yaparlar. Her bir frekans bandında yayınlanan sinyal, bulunduğu frekans bandına ve GPS sinyallerinin alıcıya ulaşmadan önce izlediği rota üzerindeki toplam serbest elektron miktarına bağlı olarak gecikmeye uğrar. Alıcı tarafından bu 2 sinyalin gecikme zamanları arasındaki fark hesaplanarak, toplam gecikme hakkında bilgi edinilebilir. GPS alıcıları, bu gecikme bilgisini kullanarak gerekli düzeltmeler yapmadan hassas konum bilgisi elde edemezler. GPS sinyallerinin gecikme miktarı, sinyallerin izlediği rota üzerindeki toplam elektron miktarı ile doğrudan ilişkili olduğu için, bu gecikme bilgisi kullanılarak uydu ile alıcı arasındaki Toplam Elektron İçeriği (TEİ) hesaplanabilir. TEİ, uydu ile alıcı arasında bulunan  $1m^2$  kesit alanına sahip hayali bir silindirin içerisinde bulunan elektron sayısıdır, birimi  $10^{16}$  elektron/ $m^2$ 'ye karşılık gelen TECU'dur. Uydu ile alıcı arasındaki rota genellikle eğik bir çizgi olduğu için bu değer Eğik TEİ (ETEİ) olarak ifade edilmektedir.

Türkiye Ulusal Sabit GPS İstasyonları Ağı (TUSAGA-Aktif) sistemi Türkiye ve KKTC üzerinde dağıtmak bir şekilde yerleştirilmiş 147 sabit GPS alıcı istasyonu barındırmaktadır. Her bir alıcı istasyon devamlı olarak GPS sinyalleri ile ilgili ölçümler yapmakta ve bütün bu ölçümler Hacettepe Üniversitesi'nde bulunan IONOLAB grubuna iyonküre çalışmaları amacıyla aktarılmaktadır. Bu çalışmada, gerçek GPS ölçümleri olarak, TUSAGA-Aktif istasyonlarından toplanılan GPS sinyallerindeki gecikme bilgisi kullanılarak elde edilmiş IONOLAB-ETEİ değerleri kullanılmaktadır. IONOLAB-ETEİ metodu, 30 saniye çözünürlüğünde ETEİ bilgisi üretebilmekte, IONOLAB-BIAS yöntemiyle alıcı sapmalarını ve uydu sapmalarını hesaplayarak oldukça hassas ölçümler elde edilmektedir [4].

## III. IRI-PLAS İYONKÜRE MODELİ

IRI-Plas, iyonküre fiziğine ve deneysel ölçümlere dayalı olarak oluşturulmuş, parametrik bir iyonküre modelidir. Verilen zaman, konum ve kullanıcı tarafından seçilebilen parametrelere göre dikey elektron yoğunluğu profili üretebilen bu model, 50 km ile 20,000 km arasında iyonküre ve plazmaküreyi beraber modelleyebilmektedir. IRI-Plas modeli ve bazı geodetik hesaplamalar kullanılarak, verilen uydu ve alıcı konumu, zaman ve seçilebilen parametre kümesine bağlı olarak ETEİ hesaplaması yapmak mümkündür. Bu çalışmada, verilen iyonküre parametreleri ile IRI-Plas kullanılarak oluşturulan model tabanlı 3 boyutlu elektron yoğunluğu dağılımını gerçek GPS ölçümleri ile kıyaslayabilmek amacıyla, IRI-Plas ve [5]'de verilen yöntem kullanılarak model tabanlı ETEİ hesaplamaları yapılmaktadır.

## IV. 3 BOYUTLU ELEKTRON YOĞUNLUĞU KESTİRİMİ MODELİ

Bu çalışmada önerilen 3 boyutlu elektron yoğunluğu kestirimi modeli, hem IRI-Plas modelini hem de GPS ölçümlerini beraber kullanmaktadır. IRI-Plas modelinin parametreleri, belirlenmiş olan bölge içerisinde GPS ölçümleri ile uyumlu bir 3 boyutlu elektron yoğunluğu profili elde edebilmek amacıyla eniyileştirilmektedir.

Eniyileştirme amacıyla iyonkürenin temel belirleyici parametrelerinden olan  $f_0F_2$  (iyonkürede en yüksek elektron yoğunluğuna sahip olan F2 katmanının kritik frekansı) parametresi seçilmiştir.  $f_0F_2$  parametresi iyonküredeki en yüksek elektron yoğunluğunun değeri ile doğrudan ilişkilidir.  $f_0F_2$  parametresi temel olarak Güneş'in göreceli konumuna bağımlı olarak değişmekle beraber, Güneş fırtınalarından, geomanyetik aktivitelere de etkilenmektedir.  $f_0F_2$  parametresi kullanılarak dikey TEİ değerleri belirli fiziksel sınırlar içerisinde istenilen herhangi bir değere uyumlandırılabilir. Ancak uyumlandırılması gereken veri, geniş bir bölge içerisinde alınan eğik TEİ ölçümleri olunca,  $f_0F_2$  parametresinin uzaysal dağılımı ile ilgili özelliklerini de göz önünde bulundurmak gereklidir.

Eniyileştirilmenin yapılacağı bölge  $R$  aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$R = \{(\lambda, \phi) | \lambda_{min} \leq \lambda \leq \lambda_{max}, \phi_{min} \leq \phi \leq \phi_{max}\}. \quad (1)$$

Bu denklemde  $\lambda$  ve  $\phi$  sırasıyla enlem ve boylam değerlerini ifade etmektedir.  $f_0F_2(\lambda, \phi)$  değeri,  $(\lambda, \phi)$  konumu için aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$f_0F_2(\lambda, \phi) = f_0F_2(\lambda, \phi)_{IRI-Plas} + f(\lambda, \phi). \quad (2)$$

Burada,  $f_0F_2(\lambda, \phi)_{IRI-Plas}$ , IRI-Plas tarafından belirlenen  $f_0F_2$  değerini,  $f(\lambda, \phi)$  ise gerçek  $f_0F_2(\lambda, \phi)$  değerinden olan sapmayı ifade etmektedir. Bu çalışmada sapmaya karşılık gelen iki boyutlu  $f$  yüzeyi aşağıdaki şekilde modellenmiştir:

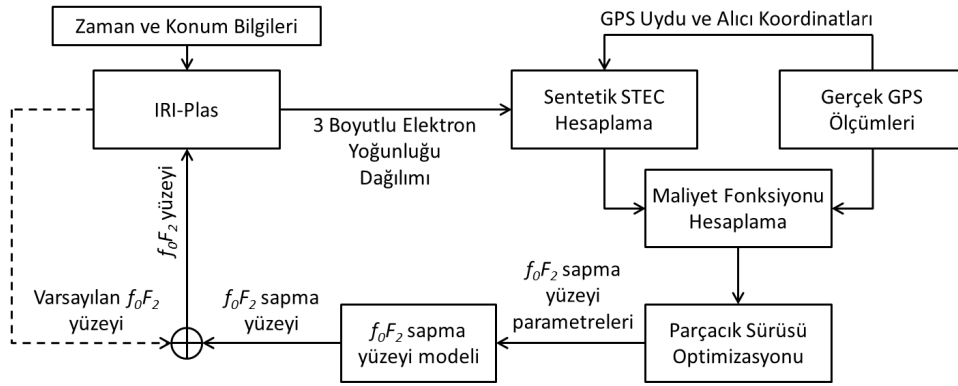
$$f(\lambda, \phi) = a_1\lambda' + a_2\phi' + a_3. \quad (3)$$

Burada, aşağıda gösterilen şekilde,  $\lambda'$  ve  $\phi'$  değerleri, tanımlı bölge içerisinde -1 ile 1 değerleri arasında sınırlandırılmıştır:

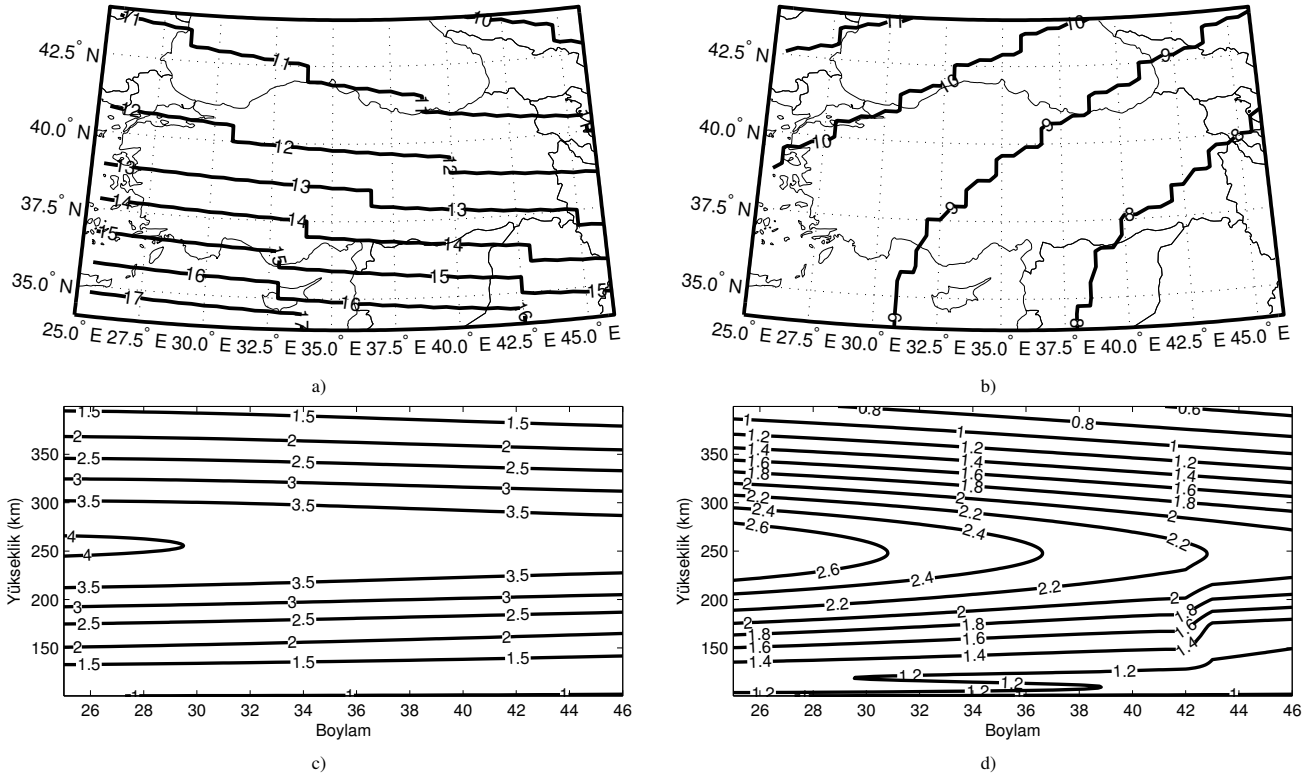
$$\lambda' = \frac{2\lambda - \lambda_{max} - \lambda_{min}}{\lambda_{max} - \lambda_{min}}, \quad (4)$$

$$\phi' = \frac{2\phi - \phi_{max} - \phi_{min}}{\phi_{max} - \phi_{min}}. \quad (5)$$

3 numaralı denklemde kullanılan  $a_1$ ,  $a_2$  ve  $a_3$  parametrelerinin her bir seçimi, Türkiye üzerinde yeni bir  $f_0F_2$  yüzeyi üretmektedir. Bu yüzey değerleri IRI-Plas modeline verildiğinde elde edilen dikey elektron yoğunluğu profilleri birleştirilerek 3 boyutlu bir elektron yoğunluğu dağılımı elde etmek mümkündür. Üretilen 3 boyutlu elektron yoğunluğu dağılımı üzerinden elde edilen eğik TEİ değerleri gerçek eğik TEİ ölçümleriyle karşılaştırılarak 3 boyutlu dağılımın ne derece geçerli olduğu belirlenebilir. Amaç, sapma yüzeyini belirleyen  $a_1$ ,  $a_2$  ve  $a_3$  parametrelerinin en iyi seçimini bularak



Şekil 1: 3 Boyutlu Elektron Yoğunluğu Kestirimi Modeli



Şekil 2: a) Varsayılan IRI-Plas ve b) eniyileştirilmiş parametreler için IRI-Plas kullanılarak elde edilen TEİ haritaları, birimi TECU cinsinden, c) Varsayılan IRI-Plas ve d) eniyileştirilmiş parametreler için elde edilen 3 boyutlu elektron yoğunluğu dağılımının 38°K enlem boyunca kesiti, birimi  $10^{11}$  el/m<sup>3</sup> cinsinden verilmiştir.

gerçek eğik TEİ ölçümleriyle en iyi uyumu sağlayan iyönküreyi oluşturmaktır. Eniyileme aşağıdaki maliyet üzerinden yapılabilir:

$$C = \frac{\|E_{TEI_M} - E_{TEI_{IRI-Plas}}\|_2}{\|E_{TEI_M}\|_2}. \quad (6)$$

Burada  $E_{TEI_M}$ , IONOLAB-ETEİ verisinden elde edilmiş GPS bazlı gerçek ETEİ ölçümlerini içeren diziyi,  $E_{TEI_{IRI-Plas}}$  ise  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  parametreleri kullanılarak oluşturulan IRI-Plas modeli tabanlı iyönküre üzerinde [5]'de

verilen yöntem kullanılarak elde edilen model tabanlı ETEİ değerlerini içeren diziyi göstermektedir.

Sapma yüzeyi parametreleri  $a_1$ ,  $a_2$  ve  $a_3$ , 6 numaralı denklemde ifade edilen maliyeti en aza indireyecek şekilde bir eniyileme tekniği kullanılarak bulunabilir. Bu çalışmada, Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) tekniği kullanılarak elde edilen sonuçlar verilmiştir. PSO bugüne kadar birçok problemin çözümünde başarıyla kullanılmış bir eniyileştirme yöntemidir. Problemlerin çözümündeki en temel nokta, problemleri PSO ile çözüme uygun bir şekilde en az sayıda bilinmeyen ile modelleyebilmektir. Parametrelerin sayısı, çözüm uzayının boyut sayısını belirler, bu nedenle parametrelerin

sayısı arttıkça PSO yönteminin uygulanabilirliği azalmaktadır.

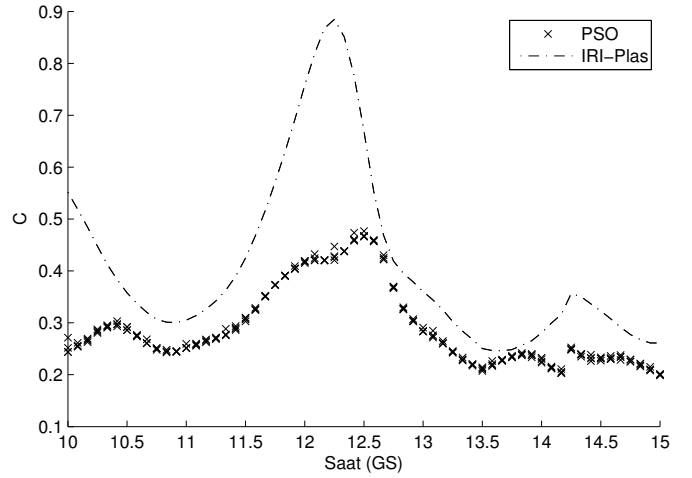
Bu çalışmada önerilen 3 boyutlu elektron yoğunluğu kestirimi modelinin akış şeması Şekil 1’de verilmiştir. Başlangıçta 3 boyutlu çözüm uzayına rastgele dağıtılan her bir parçacık Türkiye üzerinde 3 parametre ile oluşturulan bir  $f_0F_2$  sapma yüzeyine karşılık gelmektedir. Her bir parçacığın karşılık geldiği  $f_0F_2$  yüzeyi ve IRI-Plas modeli kullanılarak 3 boyutlu bir elektron yoğunluğu dağılımı hesaplanmakta, bu dağılım kullanılarak gerçek GPS ölçümlerinin yapıldığı rota üzerinde [5]’de verilen yöntemle model tabanlı ETEİ hesaplamaları yapılmaktadır. Elde edilen model tabanlı ETEİ hesaplarının gerçek GPS ölçümleri ile uyumluluğu 6 numaralı denklem kullanılarak hesaplanmaktadır. Daha sonra PSO yöntemi kullanılarak uzayda hareket ettirilen bu parçacıklar, gerçek GPS ölçümlerinden elde edilen ETEİ değerleriyle en uyumlu 3 boyutlu elektron yoğunluğu dağılımını yaratan ve IRI-Plas modeli ile de uyumlu olan  $f_0F_2$  sapma yüzeyini bulmaya çalışmaktadırlar. Belirli bir döngü sayısına ulaşıncaya kadar parçacıkların bulunduğu en iyi konuma karşılık gelen parametreler çözüm olarak kabul edilmektedir.

## V. SONUÇLAR

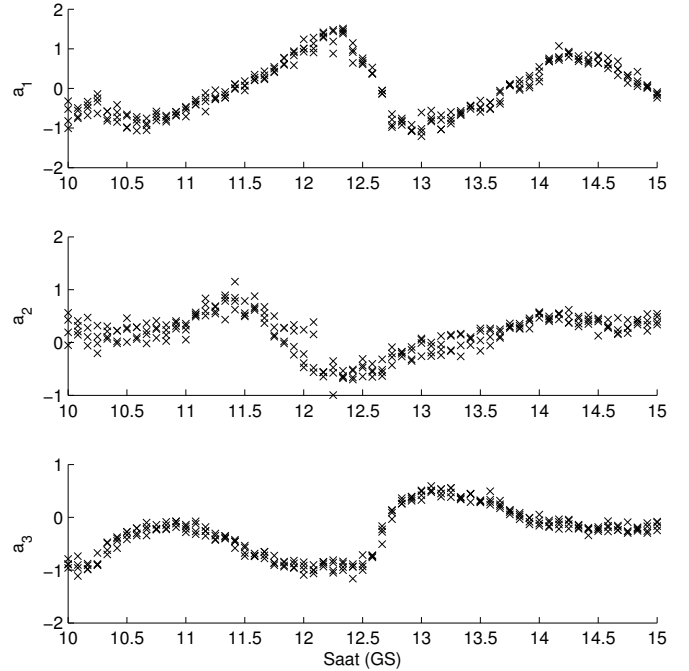
Bu çalışmada önerilen 3 boyutlu elektron yoğunluğu kestirimi modeli, IONOLAB-ETEİ verileri ve IRI-Plas modeli kullanılarak, 20 Haziran 2009 tarihi, 10:00 Greenwich Saati (GS) ve 15:00 GS arasında 5’er dakikalık aralıklarla, Türkiye’nin bulunduğu  $34^\circ - 44^\circ$  kuzey enlemleri ile  $25^\circ - 46^\circ$  doğu boylamları arasında iyonküre kestirimi yapabilmek amacıyla koşturulmuştur. PSO algoritmasında parçacık sayısı 50, döngü sayısı ise 100 ile sınırlandırılmıştır. PSO algoritmasının rasal yapısı nedeniyle her deneme 4’er kez tekrarlanmıştır. Elde edilen sonuçlara örnek olarak, Şekil 2’de a) ve b)’de verilen grafiklerde, 10:00 GS’de, sırasıyla varsayılan IRI-Plas parametreleri ve PSO ile eniyileştirilmiş parametrelerle elde edilen dikey TEİ haritaları, c) ve d)’de ise sırasıyla varsayılan ve eniyileştirilmiş parametrelerle elde edilen 3 boyutlu elektron yoğunluğu dağılımlarının  $38^\circ$ K enlemindeki kesitleri verilmiştir. Şekil 3’de verilen grafikte, 10:00 GS ile 15:00 GS arasında her bir 5 dakikalık aralık için, IRI-Plas modelinden varsayılan parametrelerle elde edilen 3 boyutlu elektron yoğunluğunun IONOLAB-ETEİ ölçümleri ile uyumluluğunu ifade eden maliyet fonksiyonunun çıktıları ve IRI-Plas modelinden eniyileştirilmiş parametrelerle elde edilen 3 boyutlu elektron yoğunluğu dağılımının IONOLAB-ETEİ ölçümleri ile uyumluluğunu ifade eden maliyet fonksiyonunun çıktıları beraberce gösterilmektedir. Sonuçlardan da görülebileceği üzere, gerçek ölçümlerle oldukça farklı sonuçlar verebilen IRI-Plas modeli, girdi parametreleri eniyileştirilerek ölçümlerle çok daha uyumlu bir 3 boyutlu elektron yoğunluğu dağılımı üretecek hale getirilebilmektedir. Şekil 4’de verilen grafikte, ilgili zaman aralıkları için eniyileştirilen sapma yüzeyi parametreleri verilmektedir. Elde edilen sonuçlar, eniyileştirilen bu parametrelerin beklenileceği üzere çözüm uzayında ortak bir noktaya yakınsadığını, ve zaman ekseninde de bir bağıntısının olduğunu göstermektedir.

## KAYNAKÇA

[1] Bilitza, D., “International Reference Ionosphere 2000”, Radio Science, 36, #2, 261-275, 2001.



Şekil 3: Varsayılan IRI-Plas iyonküre parametreleri ile elde edilen maliyet fonksiyonu ve eniyileştirilmiş parametreler ile elde edilen maliyet fonksiyonunun karşılaştırılması



Şekil 4: PSO ile eniyileştirilen yüzey parametreleri

- [2] Gulyaeva, T.L., and Bilitza, D., “Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model”. In “New Developments in the Standard Model”, edited by R.J. Larsen, pp. 1-39, NOVA, Hauppauge, New York, 2012.
- [3] Kennedy, J., and Eberhart, R., “Particle Swarm Optimization”, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, p. 1942-1948, 1995.
- [4] Nayir, H., Arıkan, F., Arıkan, O., and Erol, C. B., “Total Electron Content Estimation with Reg-Est”, J. Geophys. Res., 112, A11313, doi:10.1029/2007JA012459, 2007.
- [5] Tuna, H., Arıkan, O., Arıkan, F., Gulyaeva, T.L., and Sezen, U., “Online user-friendly slant total electron content computation from IRI-Plas: IRI-Plas-STEC”, Space Weather, 12, doi:10.1002/2013SW000998, 2014.