

KD HABERLEŞME İÇİN İYONKÜRENİN PLAZMA FREKANSI - YÜKSEKLİK PROFİLİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

MATHEMATICAL MODELING OF THE PLASMA FREQUENCY - HEIGHT PROFILE OF THE IONOSPHERE FOR HF COMMUNICATIONS

Cenk Toker, Feza Arıkan
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi
{cenk.toker, arikan}@ee.hacettepe.edu.tr

Orhan Arıkan
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe —İyonkürenin plazma frekansı - yükseklik profili özellikle gökdalgası ile yapılan KD haberleşmesini önemli derecede etkilemektedir. Bu çalışmada, belirli bir coğrafik bölge üzerinden bulunan bu profilin, enküçük kareler yöntemi ile doğrusal ve küresel düzlem modellerine oturtulmakta incelenmiştir. IRI-Plas-G ile gerçeğe yakın profiller elde edilerek, bahsi geçen modellerin Ankara çevresindeki bir bölge için bu profillere uygunluğu gösterilmektedir.

Anahtar Kelimeler—KD haberleşme, İyonküre, IRI-Plas-G, Kanal Modeli, Enküçük Kareler Oturtma

Özet—The plasma frequency - height profile of the ionosphere has an important impact on sky-wave HF communications. In this study, the profile obtained over a geographical region is fit to linear and spherical plane models by using the least-squares method. Conformity of these models to the plasma frequency - height profile is verified by comparing to the profile provided by IRI-Plas-G for a region around Ankara.

Keywords—HF Communications, Ionosphere, IRI-Plas-G, Channel Model, Least-Squares Fit

I. GİRİŞ

İyonkürenin plazma frekansı-yükseklik profili, gök dalgası ile yapılan Kısa Dalga (KD) haberleşmesinde belirleyici bir etkiye sahiptir [1]. Bu plazma frekansı - yükseklik profili, güneşin yirmidört saatlik döngüsü başta olmak üzere çeşitli nedenlerle zamana ve uzaysal konuma değişim göstermektedir. Dolayısıyla, iyonküre içinde, belirli bir plazma frekansına sahip kütle zamana bağlı olarak alçalıp yükselebilmektedir. Dahası, bu değişim uzaysal olarak da gözlenmektedir; iyonkürenin farklı noktalarında aynı plazma frekansı farklı yüksekliklerde bulunabilmektedir.

Bu durum, KD haberleşmesinde, kurulan bağlantının parametrelerinin uzun süre boyunca sabit kalamamasını ve sürekli uyarlanmaya ihtiyaç duyulmasını getirmektedir. Bu amaçla kullanılan, alıcı/verici çiftinin haberleşme frekansını kontrol eden çeşitli algoritmalar bulunmaktadır. Ancak bu algoritmalar genellikle iyonkürenin anlık özelliklerini gözardı ederek alıcı/verici sistemi arasındaki bir kapalı döngü kontrol mekanizması presibine göre çalışmaktadır. İyonküreden alınan ölçümlere dayalı daha sağlıklı çalışan algoritmalar da geliştirilebilir ancak bunun yapılabilmesi için hem işletmesi zor,

hem de fiziki boyutları nedeniyle mobil kullanım için çok da elverişli olmayan pahalı ekipmanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu bildiride yapılan çalışmada ise, plazma frekansı - yükseklik profilinin verildiği varsayılarak, iyonkürenin belirli bir plazma frekansına sahip kütesinin matematiksel bir ifade ile temsil edilmesi incelenmektedir. Bu amaçla, başta yüksekliğe bağlı olarak iyonküredeki iyon/elektron yoğunluğu olmak üzere iyonkürenin değişik parametrelerini sağlayabilen IRI-Plas-G kullanılmıştır.

IRI-Plas-G programı, IRI [2] ve IRI-Plas'a [3] getirilen iyileştirmelerle IONOLAB grubu tarafından geliştirilmiştir. IRI-Plas-G, IRI modelinin tüm çıktılarını IRI-Plas hesaplama yüksekliği olan 20.200 km'ye kadar istenilen yükseklik çözünürlüğünde (örn. 1km) hesaplayabilmektedir. Kolay kullanılan program arayüzü ile istenilen konular, tarihler ve saatler programa girilebilmekte ve çıktılar veri yapılarına uygun olarak saklanmaktadır. IRI-Plas-G çıktıları, kullanıcının isteğine göre Türkiye için en uygun doğrusal düzlem varsayımı altında [4], deneysel yardışinti serimlerinde literatürde ilk kez Marten Fonksiyonu için Parçacık Sürü Optimizasyonu kullanılarak Evrensel Krigleme ile aradeğerleme yapılabilmektedir [5], [6].

Bu bildiride, belirli bir coğrafi bölgede alınan plazma frekansı - yükseklik profilleri enküçük kareler maliyet işlevi kullanan bir eniyileme problemi vasıtasıyla doğrusal ve küresel düzlem modellerine oturtulmaktadır. Elde edilen sonuçlar gözönüne alınan modellerin iyonkürenin davranışı ile çok iyi bir uyum içinde olduğunu göstermiştir.

Buradan elde edilen modeller, matematiksel basitlikleri sayesinde, özellikle KD haberleşme için iyonküre içinde ışın izleme yöntemlerinin incelenmesini elverişli kılacaktır.

II. DOĞRUSAL VE KÜRESEL MODELLER

A. ECEF ve GEOCENTRIC Koordinat Sistemleri

Bu çalışmada iyonküredeki katmanların modellenmesinde iki farklı koordinat sistemi gözönüne alınmaktadır. Bunlar Yer-Merkezli-Yere göre-Sabit (Earth-Centred-Earth-Fixed, ECEF) kartezyen ve Yer-Merkezli (GEOCENTRIC) küresel koordinat sistemleridir.

(X, Y, Z) üçlüsü ile gösterilen ECEF koordinatlarında orijin noktası $(0, 0, 0)$ dünyanın ağırlık merkezi seçilir. X 0°

enlem ve 0° boylamı işaret eden yöndeki eksen, Y 0° enlem ve 90° boylamı işaret eden yöndeki eksen, Z ise kuzeyi işaret eden X ve Y eksenlerine dik eksenidir.

(ϕ, λ, h) üçlüsü ile gösterilen GEOCENTRIC koordinatlarında orijin noktası $(0, 0, 0)$ yine dünyanın ağırlık merkezi seçilir. ϕ ekvator düzleminde kuzey yönünde yapılan açıyı, λ Greenwich'ten geçen 0° meridyeninden doğu yönüne doğru yapılan açıyı, h ise orijin noktasından uzaklığı ifade eder. Burada dünyanın yarıçapı $R = 6378.1$ km alınabilir.

Her iki koordinat sistemi arasındaki dönüşüm, kartezyen-küresel koordinat sistemlerindeki dönüşüme benzerdir:

$$\phi = \sin^{-1}(Z/\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}) \quad (1)$$

$$\lambda = \tan^{-1}(Y/X) \quad (2)$$

$$h = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (3)$$

ve

$$X = h \cos(\phi) \cos(\lambda) \quad (4)$$

$$Y = h \cos(\phi) \sin(\lambda) \quad (5)$$

$$Z = h \sin(\phi) \quad (6)$$

olarak yazılır.

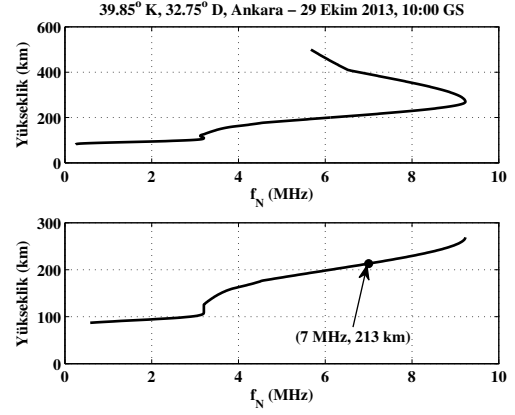
B. IRI-Plas-G modeli

IRI-Plas programı [3], verilen bir tarih ve saatte (bu çalışmada GS (Greenwich Saati) zaman standardı kullanılmaktadır), verilen bir GEOCENTRIC koordinatta başucu yönündeki plazma frekansı-yükseklik profilini, $f_N(h')$, vermektedir. Burada h' yerden yüksekliğinden başucu yönündeki yüksekliği ifade etmekte ve h değerini bulmak için dünyanın yarıçapı R 'nin h' 'a eklenmesi gerekmektedir, $h = h' + R$.

IRI-Plas'ın bir kere çalıştırılması, dünya üzerindeki bir noktaya ait, belirtilen zamandaki profili vermektedir. Ankara (39.85° K, 32.75° D) koordinatları için 29 Ekim 2013, 10:00GS'ye ait örnek bir profil Şekil 1'de üst şekilde verilmektedir. Şekilden anlaşılacağı üzere, başucu yönünde f_N frekansı ile gönderilen bir radyo sinyali, yerel başucu yönüne doğru bakıldığında f_N 'in eğriyi ilk kestiği yükseklikten yansımaya yere geri döndüğü gözönüne alınmaktadır. Bu örnekte iyonkürenin geri yansıtılabileceği enyüksek frekans, F_2 katmanı kritik frekansı olarak anılan $f_oF_2 = 9.23$ MHz'dir ve yerden yüksekliği $hmF_2 = 268$ km'dir. Bir anlamda gölgede kalan 268 km'nin üzerindeki ve $110 - 126$ km arasındaki E katmanı çukurluğu dışındaki yüksekliklerdeki iyonküre katmanları $1 - 9.23$ MHz aralığındaki gönderilen radyo dalgalarını yere geri yansıtılmaktadır. Dolayısıyla iyonkürenin yerden gelen radyo dalgalarını yansıttığı plazma frekansı - yükseklik profili Şekil 1'de alt şekildeki gibi hesaplanabilir. Şekilde, bildirinin devamında örnek olarak kullanılacak $f_N = 7$ MHz plazma frekansının yüksekliği (213 km) de işaretlenmiştir.

Bir bölge üzerindeki profil elde edilmek istenirse, bir ızgara yapısı tanımlanarak IRI-Plas tüm ızgara noktaları üzerinde teker teker çalıştırılabilir. Örneğin, incelenecek bölgenin enküçük ve enbüyük enlem değerleri sırasıyla ϕ_{\min} ve ϕ_{\max} , enküçük ve enbüyük boylam değerleri sırasıyla λ_{\min} ve λ_{\max} iken bölge enlemde N , boylamda M eşit parçaya ayrılırsa, örneklerin alındığı noktaların koordinatları (ϕ_n, λ_m)

$$\phi_n = \phi_{\min} + (\phi_{\max} - \phi_{\min})n/N, n = 0, \dots, N \quad (7)$$



Şekil 1: (Üst) 29 Ekim 2013, 10:00GS'de Ankara koordinatları için IRI-Plas-G'nin verdiği plazma frekansı - yükseklik profili. (Alt) Yerden başucu yönünde gönderilen radyo dalgalarının yansıdığı iyonküre katmanlarının yükseklikleri.

ve

$$\lambda_n = \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min})m/M, m = 0, \dots, M, \quad (8)$$

tüm koordinatların oluşturduğu ızgara nokta kümesi \mathcal{D} de

$$\mathcal{D} = \{(\phi_n, \lambda_m), m = 0, \dots, M, n = 0, \dots, N\} \quad (9)$$

olarak tanımlanır.

Bu durumda, plazma frekansı f_N olan katmandan alınan noktaların koordinatları, GEODETIC sistemindeki üç boyutlu uzayda, $\mathbf{p}_{mn}^G = (\phi_n, \lambda_m, (h'(\phi_n, \lambda_m) + R))$, $m = 0, \dots, M, n = 0, \dots, N$ olacaktır. Gösterim kolaylığı açısından m ve n indisleri $k = m(N + 1) + n$, $k = 0, \dots, K - 1$ ($K = (M + 1)(N + 1)$) ile birleştirilirse örnek noktaları $\mathbf{p}_k^G = (\phi_k, \lambda_k, h_k)$ ile gösterilebilir.

GEODETIC \Leftrightarrow ECEF dönüşümü için Denklemler (1)-(6) kullanıldığında, örnek noktalarının koordinatları, ECEF sistemindeki üç boyutlu uzayda, $\mathbf{p}_k^E = (X_k, Y_k, Z_k)$ olacaktır. (Bildiriye E üstsembölü ECEF koordinat sistemindeki ifadeleri, G üstsembölü ise GEOCENTRIC koordinat sistemindeki ifadeleri temsil etmektedir.)

C. Düzlem Modellerine Oturtma

İyonküreden alınan ayrıık yükseklik örneklerinin belirli bir matematiksel modele oturtulması, bu bilgi üzerinden analiz yapmayı kolaylaştıracaktır. Örneğin iyonküre içindeki dalga yayılımını ışın izleme yöntemi ile incelemek için böyle bir modelin varlığı işlemleri basitleştirecektir.

Bu çalışma kapsamında \mathbf{p}_k^E noktaları doğrusal bir düzlem modeline, \mathbf{p}_k^G noktaları ise küresel bir düzlem modeline Enküçük Kareler yöntemi ile oturtulmaktadır.

1) Doğrusal Düzlem Modeli: ECEF koordinat sisteminde bir düzlem

$$a_1^E X + a_2^E Y + a_3^E Z = a_4^E \quad (10)$$

$$\mathbf{a}^{E,T} \mathbf{p}^E = a_4^E \quad (11)$$

ile ifade edilir. Burada $\mathbf{a}^E = [a_1^E \ a_2^E \ a_3^E]^T$, $\mathbf{p}^E = [X \ Y \ Z]^T$ ve a_i^E , $i = 1, \dots, 4$ düzlemi tanımlayan sabit katsayılarıdır. Burada \mathbf{a}^E ,

düzlemin birim norma sahip normal vektörüdür, düzlemin orijin noktasından uzaklığını da a_4^E katsayısı belirlemektedir.

Düzlem üzerindeki bir nokta $\mathbf{a}^{E,T} \mathbf{p} - a_4^E = 0$ eşitliğini sağlarken, düzlem dışındaki bir nokta, örn. \mathbf{p}_k^E noktası $\varepsilon_k^E = \mathbf{a}^{E,T} \mathbf{p}_k^E - a_4^E$ değerini verecektir. Bu değer, \mathbf{p}_k^E noktası ile düzlem arasındaki en kısa mesafeyi verir. Tüm \mathbf{p}_k^E örnek noktalarına en kısa mesafede olan düzlemi tanımlayan ve a_4^E katsayılarının kestirimi olan \hat{a}_4^E katsayılarını bulmak için Enküçük Kareler maliyet işlevi gözetilerek bir eniyileme problemi yazılabilir

$$\begin{aligned} \min_{\hat{a}_4^E, i=1 \dots 4} & \quad \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} |\varepsilon_k^E(\hat{a}_4^E)|^2, i = 1 \dots 4 \\ \text{s.t.} & \quad \|\hat{\mathbf{a}}^E\|^2 = 1. \end{aligned} \quad (12)$$

Bu problemin çözümü

$$\left(\mathbf{R}_p^E - \frac{1}{K} \mathbf{r}_p^E \mathbf{r}_p^{E,T} \right) \hat{\mathbf{a}}^E = \mu \hat{\mathbf{a}}^E \quad (13)$$

sisteminin en küçük özdeğerine karşılık gelen özvektörü $\hat{\mathbf{a}}_{opt}^E$ olarak, a_4^E değerini ise

$$\hat{a}_{4,opt}^E = \frac{1}{K} \mathbf{r}_p^E \hat{\mathbf{a}}_{opt}^E \quad (14)$$

olarak seçmektir. Burada $\mathbf{R}_p^E = \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{p}_k^E \mathbf{p}_k^{E,T}$ ve $\mathbf{r}_p^E = \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{p}_k^E$ olarak tanımlanmaktadır. Bu durumda yapılacak ortalama hata

$$\overline{\varepsilon^E} = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} \left| \hat{\mathbf{a}}_{opt}^{E,T} \mathbf{p}_k^E - \hat{a}_{4,opt}^E \right| \quad (15)$$

olarak bulunur.

2) *Küresel Düzlem Modeli:* Benzer bir yaklaşım GEOCENTRIC koordinat sisteminde tanımlanan küresel düzlem modeli için de izlenebilir. Bu yüzeyin ifadesi

$$a_1^G \phi + a_2^G \lambda + a_3^G h = a_4^G \quad (16)$$

$$\mathbf{a}^{G,T} \mathbf{p}^G = a_4^G \quad (17)$$

olarak yazılır.

Bu modelin öncekinden en önemli farkı, GEODETIC \Rightarrow ECEF doğrusal bir dönüşüm olmadığı için, doğrusal düzlem modeli bir plaka tanımlarken küresel düzlem modeli belirli bir eğriliği olan bir yüzey tanımlamaktadır. Ayrıca doğrusal düzlem yüzeyinin normal vektörü her noktada aynı ve $\mathbf{a}^{E,e}$ eşitken, küresel düzlemde yüzeyin normali koordinata bağlı değişmektedir. Ancak sonraki kısımda görüleceği gibi küresel düzlem modeli iyonkürenin davranışına daha iyi uyum sağlamaktadır.

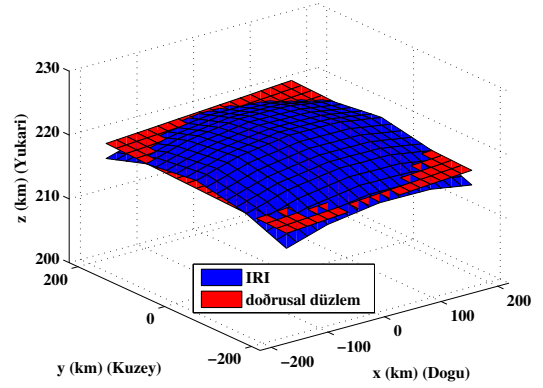
Önceki kısımdakine benzer bir analiz yürütülürse, $\mathbf{R}_p^G = \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{p}_k^G \mathbf{p}_k^{G,T}$ ve $\mathbf{r}_p^G = \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{p}_k^G$ tanımları ile, enküçük kareler anlamında \mathbf{p}_k^G noktalarına eniyi uyumu sağlayan $\hat{\mathbf{a}}_{opt}^G$ değeri

$$\left(\mathbf{R}_p^G - \frac{1}{K} \mathbf{r}_p^G \mathbf{r}_p^{G,T} \right) \hat{\mathbf{a}}^G = \mu \hat{\mathbf{a}}^G \quad (18)$$

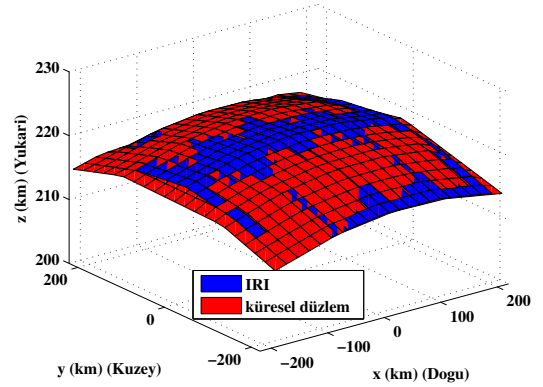
sisteminin en küçük özdeğerine karşılık gelen özvektör, \hat{a}_4^G değeri ise

$$\hat{a}_{4,opt}^G = \frac{1}{K} \mathbf{r}_p^G \hat{\mathbf{a}}_{opt}^G \quad (19)$$

olarak bulunur.



Şekil 2: 29 Ekim 2013, 10:00GS'de Ankara'nın $\pm 2^\circ$ enlem ve $\pm 2^\circ$ boylam çevresinden alınan örneklerden elde edilen $f_N = 7$ MHz plazma frekansına sahip katmanın yüksekliği.



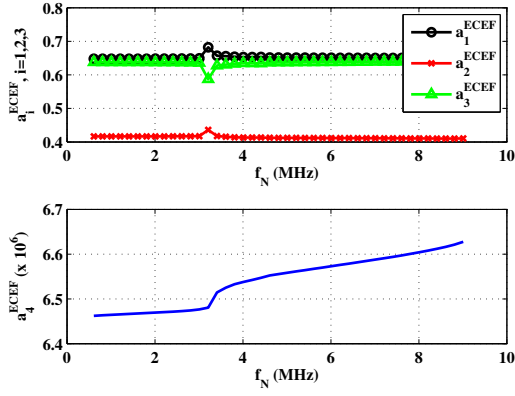
Şekil 3: 29 Ekim 2013, 10:00GS'de Ankara'nın $\pm 2^\circ$ enlem ve $\pm 2^\circ$ boylam çevresinden alınan örneklerden elde edilen $f_N = 7$ MHz plazma frekansına sahip katmanın yüksekliği.

III. BENZETİM SONUÇLARI

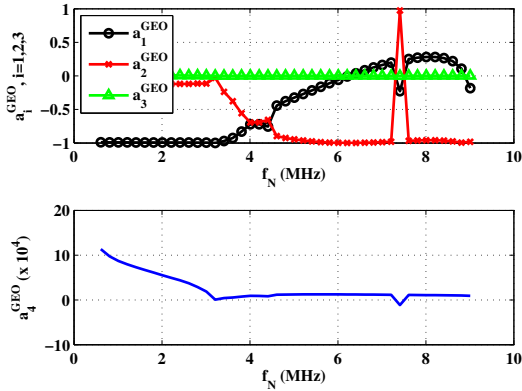
29 Ekim 2013, 10:00GS'de Ankara (39.85° K, 32.75° D) çevresinde GEOCENTRIC koordinat sisteminde eşit aralıklı alınmış $f_N = 7$ MHz plazma frekansına sahip katmanın yüksekliği için örnekler Şekil 3'te verilmektedir. Bu örnekler ait eğri yüzey ve Denklemler (13) ve (14) ile elde edilen doğrusal düzlem yüzeyi Şekil 2'te gösterilmektedir. Gösterim için algılanma kolaylığı nedeniyle Doğu-Kuzey-Başucu (East-North-Up, ENU) koordinat sistemi tercih edilmiştir. ENU yerel bir kartezyen koordinat sistemidir, Şekil 2'te orijin noktası Ankara, x eksenı doğu, y eksenı kuzey ve z eksenı başucu yönünü (yerden yüksekliği) göstermektedir.

Benzer şekilde, Denklemler (18) ve (19) ile elde edilen küresel düzlem yüzeyi, IRI-Plas-G'nin sağladığı yüzey ile Şekil 3'te karşılaştırılmaktadır. Her iki şekilden de ilgili modellerin IRI-Plas-G verisi ile çok iyi uyum içinde olduğu gözlenmektedir. Küresel düzlem IRI-Plas-G verisindeki küresel eğri yapıyı daha iyi temsil etmektedir.

Şekil 4 ve 5'de doğrusal ve küresel düzlem modellerindeki



Şekil 4: ECEF koordinat sisteminde hesaplanmış $\hat{a}_i^G, i = 1, \dots, 4$ parametrelerinin plazma frekansı f_N 'e göre değişimi



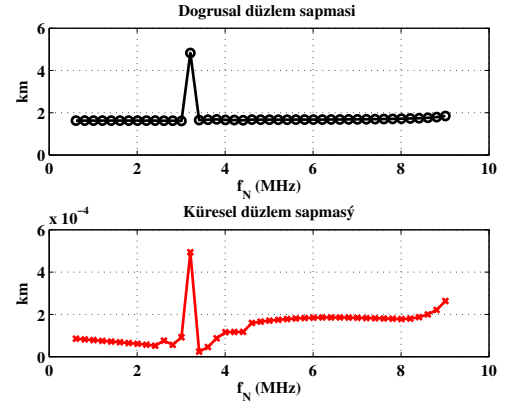
Şekil 5: GEOCENTRIC koordinat sisteminde hesaplanmış $\hat{a}_i^G, i = 1, \dots, 4$ parametrelerinin plazma frekansı f_N 'e göre değişimi

$a_i, i = 1, \dots, 4$ parametrelerinin genel olarak plazma-frekansı f_N 'e göre değişimleri gösterilmektedir. Şekil Şekil 6'de ise ilgili modeller kullanıldığında IRI-Plas-G değerlerinden ne kadar sapıldığı verilmektedir. Doğrusal model çoğu f_N değerleri için nispeten benzer \hat{a} vektörleri döndürmektedir. Bunun anlamı modelin bulunduğu düzlemin normali çoğu f_N değerleri için aynı yönü işaret etmektedir. Dördüncü parametre \hat{a}_4^E ise düzlemin f_N 'e bağlı yükselişi hakkında ipucu vermektedir. Sadece, Şekil 1'den görülebileceği gibi E katmanının olduğu yüksekliklerdeki atlama \hat{a}_4^E değerlerinde bir sapmaya neden olmaktadır. Benzer bir karakteristik küresel modelde gözlenmemektedir. $\hat{a}_i^G, i = 1, \dots, 4$ değerleri f_N 'e bağlı olarak ciddi miktarda değişmektedir.

Öte yandan Şekil 6'den doğrusal modelin ortalama 1.7 km hataya neden olduğu görülürken, küresel modelin IRI-Plas-G verisine çok iyi uyum sağladığı görülmektedir.

IV. SONUÇLAR

Gök dalgası ile KD haberleşmenin üzerinde iyonkürenin elektron yoğunluğu - yükseklik profilinin önemli bir etkisi bulunmaktadır. Bu profilin belirli bir coğrafi bölge üzerinde,



Şekil 6: Doğrusal ve Küresel düzlem modellerinin IRI-Plas-G'nin verdiği yükseklik profilinden ortalama sapması

sabit bir plazma frekansı değeri için çıkarılması, iyonkürenin davranışının KD haberleşmesi açısından incelenmesi için önemli bilgiler vermektedir. Bu bildiriye, ele alınan bölgede (Ankara çevresi) IRI-Plas-G programı ile elde edilen profilin, doğrusal ve küresel düzlem modellerine oturtulması incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda her iki modelin de, özellikle de küresel modelin profil ile çok iyi uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

Işın izleme gibi tekniklerde, yansımanın olduğu yüzeyin matematiksel ifadesinin basitliği, analizlerin kolaylığı açısından önem taşımaktadır. Bu bildiriye öne atılan doğrusal ve küresel modeller bu bakımdan elverişli bir altyapı sunmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma kısmen Ortak TUBITAK 112E568 ve RFBR 13-02-91370-CTa numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] N. Maslin, HF Communications: A Systems Approach, Pitman, 1987.
- [2] D. Bilitza ve B. Reinisch, B, "International Reference Ionosphere 2007: Improvements and New Parameters", Adv. Space Res., 42, 599-609, (2008).
- [3] T.L. Gulyaeva, ve D. Bilitza, "Towards ISO Standard Earth Ionosphere and Plasmasphere Model". in "New Developments in the Standard Model", editör R.J. Larsen, sf. 1-39, NOVA, Hauppauge, New York, 2012.
- [4] C. Toker, Y.E. Gökdağ, F. Arıkan, ve O. Arıkan, "Application of Modified Particle Swarm Optimization Method for Parameter Extraction of 2-D TEC Mapping", EGU General Assembly 2012, 22-27 Nisan 2012, Viyana, Avusturya.
- [5] I. Sayın, F. Arıkan, ve O. Arıkan, "Regional TEC Mapping with Random Field Priors and Kriging", Radio Sci., cilt.43 , 2008.
- [6] M.N. Deviren, F. Arıkan ve O. Arıkan, "Investigation of Ionospheric Trend over Turkey Using Sliding Window Statistical Analysis Method", IEEE 21. SIU 2013, 14-26 Nisan 2013, Girne, KKTC.