

Türkiye İyonküre Yönsemesinin Kayan Pencere İstatistiksel Analiz Yöntemi ile İncelenmesi

Investigation of Ionospheric Trend over Turkey Using Sliding Window Statistical Analysis Method

M. Necat Deviren, Feza Arıkan
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi
Ankara, Türkiye
Email: mnecatdeviren@gmail.com
arikan@hacettepe.edu.tr

Orhan Arıkan
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
Ankara, Türkiye
Email: oarikan@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe —Bu çalışmada, Türkiye üzerinde iyonküre yönsemesindeki değişimlerin Kayan Pencere Analiz Yöntemi (KAPA) ile istatistiksel olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Yöntem uygulanırken, orta enlem iyonküre yönsemesindeki değişimler bir veya birkaç yıllık periyotlar içerisinde incelenerek, zaman içinde değişen ortalama değer ve standart sapmalar kayan pencere kullanılarak elde edilmiştir. Bunun yanısıra kayan pencere içinde değışinti kestirimleri elde edilmiştir. KAPA yöntemi TUSAGA-Aktif ağından 2009-2012 yılları arasında TEİ kestirimlerine uygulanmış ve Türkiye ve KKTC üzerinde iyonküre yönsemesinin Geniş Anlamda Durağanlık (GAD) süresi ilk kez belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler— İyonküre, Toplam Elektron İçeriği (TEİ), Kayan Pencere İstatistiksel Analizi (KAPA), Geniş Anlamda Durağanlık (GAD).

Abstract—In this paper, variability of trend over Turkey is investigated statistically by Sliding Window Statistical Analysis (SWSA) method. First and second moment of the variability of ionospheric trend is calculated by SWSA method in a period of several years. Variance bounds are also obtained. This method is applied to Total Electron Content (TEC) estimates which are obtained from Turkish National Permanent GPS Network (TNPNGN-Active) between 2009 and 2012. The Wide Sense Stationarity (WSS) period of ionospheric trend over Turkey is determined for the first time.

Keywords— Ionosphere, Total Electron Content (TEC), Sliding Window Statistical Analysis (SWSA), Wide Sense Stationarity (WSS).

I. GİRİŞ

Yeryüzünden yaklaşık olarak 90 km ile 1100 km arasında yükseklikte yer alan iyonküre, güneşten gelen yüksek enerjili mor ötesi ve X ışınları ile iyonize olmuş gazlardan oluşan bir plazma ortamıdır. Bu atmosfer katmanı elektromanyetik dalgaları frekanslarına göre soğurması, kırması ve yansıtmasından ötürü radyo dalgalarının yayılımı açısından çok önemli yere sahiptir. Özellikle radyo dalgalarının iyonküreden ve

yerden yansıtılarak uzak bölgeler ile iletişimin sağlandığı sivil ve askeri Kısa Dalga (KD) haberleşmesi için iyonkürenin yapısının bilinmesi gerekmektedir.

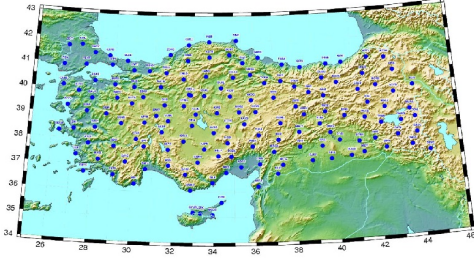
İyonküre katmanı uydu haberleşmesi açısından da önemli bir yer tutar. Uydu haberleşmesinde kullanılan yüksek frekanslı sinyaller, iyonküreden geçerken frekansın fonksiyonu olan gecikmeye ve kırılmaya uğrarlar [1]. Bu durum özellikle seyir, güdüm ve konumlama uydu sistemleri için düzeltilmesi gereken temel hatalardan birini oluşturur.

İyonküre tarafından etkilenen tüm bu sistemlerde iyonküre tabanlı oluşan hataların en aza indirgenmesi ve iyonkürenin uzay-zaman değişimine göre gürbüz sistemlerin oluşturulması açısından, iyonkürenin yapısı bilinmeli ve gözlemlenebilmelidir.

İyonkürenin karakteristiğini ifade eden en önemli parametrelerden biri Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. TEİ, uydu ile alıcı arasındaki 1 m^2 kesitli bir silindirik boyunca toplam elektron miktarını ifade eder. Birimi TECU olup 1 TECU , 10^{16} elektron/ m^2 'dir. TEİ konum, yükseklik, zaman, jeomanyetik, yerçekimsel ve sismik aktiviteler gibi pek çok etmenin fonksiyonudur [2]. İyonkürenin, tüm bu farkı etkenlerle değişimi ancak istatistiksel yöntemlerle belirlenebilir.

İyonküresel TEİ kestirimi için yertabanlı ve uydu tabanlı olmak üzere çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Yertabanlı tekniklere iyonosonda, geri saçılım radarı, evreyuysuz geri saçılım radarı örnek teşkil ederken; uydu tabanlı sistemlerden bazıları ise Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS, Global Positioning System -GPS), GLONASS ve TOPEX/Poseidon sistemleridir. Dünya üzerinde geniş alanlara yayılmış bulunmasından ve sürekli çalışmalarından ötürü YYS alıcıları diğer ölçüm aletlerine göre daha ekonomik ve kolaydır.

Harita Genel Komutanlığı (HGK) tarafından Türkiye ve KKTC üzerine bu amaçla konuşlandırılmış TUSAGA-Aktif YYS alıcı ağı, Mayıs 2009'dan bu yana düzenli olarak çalışmaktadır. Şekil 1'de gösterilen TUSAGA-Aktif YYS alıcı ağı, Türkiye ve Kuzey Kıbrıs olmak üzere 80 km ile 100 km arası uzaklıkla yerleştirilmiş 146 istasyondan oluşmaktadır. Bu YYS alıcıları kullanılarak 2009'dan bu yana İONOLAB grubu tarafından TEİ kestirimleri yapılmaktadır [3], [4], [5].



Şekil 1. TUSAGA-Aktif YKS alıcı istasyonlarının Türkiye üzerindeki dağılımı

[6]. IONOLAB-TEİ değerleri istatistiksel olarak incelenerek Türkiye iyonküre modelinin konuma ve zamana göre değişimleri incelenebilir.

Konumda ve zamanda değişiklik gösteren birçok doğa olayı uzay-zaman rassal fonksiyon olarak modellenmektedir [7]. Rassal fonksiyonun kaynaklandığı fiziksel olaya göre farklı uzay-zaman modelleri kullanılmaktadır. Belli bir anda TEİ değerlerinin rassal fonksiyonu $Z(\mathbf{x}, t)$, bir yönseme fonksiyonu olan ve düşük frekans değişimlerini modelleyen $\mu(\mathbf{x}, t)$ ile beklentisi sıfır (zero mean) olan ve ani değişimleri modelleyen bir rassal kalıntı fonksiyonunun $Y(\mathbf{x}, t)$ toplamı olarak ifade edilebilir [7] ve aşağıdaki gibi verilir:

$$Z(\mathbf{x}, t) = \mu(\mathbf{x}, t) + Y(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

Denklem (1)'de $\mathbf{x} = [\theta \ \phi]^T$ konum vektörünü ifade ederken, θ enlemi (derece) ve ϕ boylamı (derece) göstermektedir. $[\cdot]^T$ ise matematiksel devriği operatörünü tanımlar. İyonküre farklı enlem ve boylamda, günün değişik saatlerinde, sakin ve bozunmalı günlerde farklı yönseme fonksiyonu ile modellenebilir.

TÜBİTAK 109E055 projesi kapsamında yapılan çalışmalarda iyonkürenin sakin ve bozunmalı günlerini en iyi şekilde yansıtacak TEİ modelleri keştilmiştir. Proje kapsamında oluşturulan gürültüsüz ve gürültülü sentetik yüzeyler üzerindeki düzgün örnekleme noktalarından alınan değerler kullanılarak Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization- PSO) yöntemi ile farklı yüzeyler oturtulmuş ve Türkiye iyonküre yönseme modeli bulunmuştur. İyonküreyi modelleyen çift çekirdekli Gauss yüzeyi üzerine oturtulan farklı yüzeyler arasında Türkiye'yi kapsayan bölgede makul hatalar verdiği için bölgesel olarak Türkiye iyonküre yönseme modelinin doğrusal olarak modellenebileceği gösterilmiştir [8], [9].

Bu çalışma kapsamında Türkiye iyonküre yönseme modeli doğrusal kabul edilerek parametreleri enaz kareler yöntemi ile hesaplanmıştır. İyonküre yönsemesindeki değişimler KAPA yöntemi [10], [11] ile istatistiksel olarak ilk defa incelenmiş ve doğrusal yönseme katsayılarının kestirimleri kullanılarak Türkiye iyonküre yönseme modelinin günlük, mevsimlik, yıllık ve üç yıllık GAD süreleri belirlenmiştir.

Bölüm II'de doğrusal yönseme modelinin parametre kestirimlerinin hesaplanma tekniği gösterilmiştir. Bölüm III'de KAPA yöntemi anlatılmış ve GAD süresinin nasıl bulunacağı tanımlanmıştır. Bölüm IV ise bulgular anlatılmış ve sonuçlar eklenmiştir.

II. DOĞRUSAL YÖNSEME MODELİ

Orta enlem iyonküre modelini ifade eden doğrusal yönseme fonksiyonu uzayda herhangi bir noktada, \mathbf{x} ve herhangi bir anda, t , $\mu(\mathbf{x}, t)$ şeklinde gösterilir ve aşağıdaki şekilde verilir:

$$\mu(\mathbf{x}, t) = a_1(t) + a_2(t)\theta + a_3(t)\phi \quad (2)$$

Burada $a_1(t)$ yönsemenin külçe değerini, $a_2(t)$ enlemin ve $a_3(t)$ boylamın katsayı değerlerini gösterir. Yönseme modelinin parametreleri, ölçüm noktalarından elde edilmiş TEİ kestirimlerini kullanarak enaz kareler yöntemi ile t_0 anında aşağıdaki gibi bulunur.

$$\mathbf{M}\mathbf{a}(t_0) = \mathbf{b}(t_0) \quad (3)$$

Burada \mathbf{M} doğrusal yönseme modelini ifade eder ve

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & \theta_1 & \phi_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \theta_{n_a} & \phi_{n_a} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \theta_{N_a} & \phi_{N_a} \end{bmatrix} \quad (4)$$

olarak ifade edilebilir. Burada $1 \leq n_a \leq N_a$ 'dir.

$\mathbf{a}(t_0)$, yönseme yüzeyinin t_0 anındaki parametrelerini gösterir ve (5) ile verilir.

$$\mathbf{a}(t_0) = [a_1(t_0) \ a_2(t_0) \ a_3(t_0)]^T \quad (5)$$

Denklem (3)'te $\mathbf{b}(t_0)$, t_0 anında N_a ölçüm noktasından alınan TEİ değerlerini içeren vektörü tanımlar. Burada katsayı vektörünün enaz kareler yöntemi ile kestiriminin t_0 anında ölçüm değerinden kestirimi

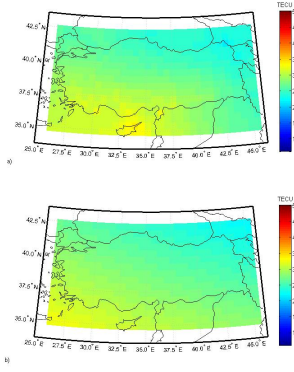
$$\hat{\mathbf{a}}(t_0) = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^T \mathbf{b}(t_0) \quad (6)$$

olarak elde edilir. Herbir katsayı kestirimi Bölüm III'te anlatılan KAPA yöntemi ile incelenmiş ve orta enlem iyonküre doğrusal yönseme kestirimlerinin GAD süreleri hesaplanmıştır.

III. KAYAN PENCERE ANALİZ YÖNTEMİ

Rassal bir fonksiyonun tam durağanlığı istatistiksel özelliklerinin değişkenlerinden bağımsız olması anlamına gelir. Tam durağanlık (1) ile ifade edilen rassal fonksiyonlar için sağlanmadığından istatistiksel analiz yapılırken ikinci dereceden durağanlık koşullarıyla sınırlı kalınır. İkinci dereceden durağanlık ise rassal fonksiyonun sadece ilk iki momentiyle ilgilidir. Bu varsayımda iyonküreyi modelleyen rassal fonksiyonun beklentisinin sabit ve eşdeğişinti fonksiyonunun sadece konumdaki ve zamandaki kaymalar ile değiştiği kabul görür.

İstatistiksel bir sürecin örneklerinden elde edilen bir veri seti durağan değilse, ilk iki momentine bakmak güvenli bir sonuç değildir. Bu yüzden zamanla değişen istatistiksel modeller incelenirken birinci ve ikinci momentlerinin kayan pencereler içerisinde hesaplanması daha güvenilir analiz yapılmasına olanak tanır [10], [11].



Şekil 2. a) 21.03.2011 tarihinde 1000 GS'de Türkiye TEİ haritası, b) 21.03.2011 tarihinde 1000 GS'de Türkiye doğrusal yönseme model kestirimi

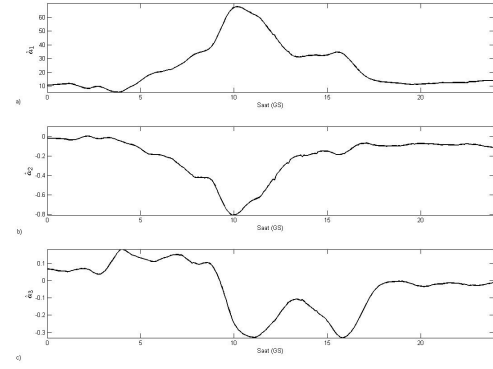
GAD süresi, KAPA yöntemi ile hesaplanan N_w uzunluğundaki kayan pencere birinci ve ikinci momentin değişmeden kaldığı süreyi tanımlar. Hesaplanan GAD süreleri TEİ haritalarının güncelleme süreleri olarak kullanılabilir [12].

Bölüm II ve III'te teorik olarak anlatılan algoritma Türkiye iyonküre katmanına uygulanmış ve elde edilen sonuçlar bir sonraki bölümde verilmiştir.

IV. BULGULAR

Bu çalışmada TUSAGA-Aktif YKS alıcılarından 2009'dan bu yana İONOLAB grubu tarafından özgün yöntemle kestirilen gürbüz ve yüksek çözünürlüklü TEİ değerleri kullanılmıştır. 2009-2012 yılları arasında Türkiye ve KKTC'yi kapsayan alanda iyonküre doğrusal modelinin GAD süreleri hesaplanmıştır. Çalışma yapılırken öncelikle daha düzenli bir veri seti oluşturmak amacıyla ızgara tabanlı bir aradeğerleme yöntemi olan Uzaklığın Karesinin Tersini ile Ağırlıklandırma (UKTA) kullanılmıştır. Böylece Türkiye ve KKTC'yi kapsayan alan üzerine $0.5^0 \times 0.6^0$ çözünürlükte bir ızgara yerleştirilerek, UKTA yöntemi ile her bir ızgara noktasının TEİ değerleri kestirilmiştir. Daha sonra her bir ızgara noktası için kestirilmiş TEİ verileri kullanılarak doğrusal yönseme parametre kestirimleri hesaplanmıştır. Doğrusal yönseme katsayılarının kestirimleri kullanılarak Türkiye üzerinde iyonküre yönseme modelinin haritaları oluşturulmuştur. Şekil 2'de 21.03.2011 tarihinde saat 1000 Greenwich Saati (GS)'de TEİ haritası (Şekil 2a) ve o andaki doğrusal yönseme modelini (Şekil 2b) gösterilmiştir.

Çalışmanın devamı olarak 2009-2011 yılları için TUSAGA-Aktif istasyonlarından kestirilen TEİ değerleri kullanılarak her beş dakikada bir doğrusal yönseme katsayı kestirimleri hesaplanmıştır. Şekil 3'de ise 21.03.2011 tarihinde her beş dakika için hesaplanan parametre kestirimleri gösterilmiştir. Şekil 3a doğrusal yönseme modelinin külçe değerini gösterirken Şekil 3b ve 3c sırasıyla enlemin ve boylamın katsayı değerlerini gösterir. Burada açıkça görüldüğü gibi külçe değeri gün içerisindeki TEİ değeriyle doğrusal olarak değişir. Enlemin katsayısı, güneşin etkisinin en yüksek olduğu saatlerde Türkiye'nin konumuna bağlı olarak güneyine daha fazla ağırlık verecek şekilde artarken gece saatlerinde ise enleme bağlılığın azaldığını gösterecek şekilde değişmektedir. Boylamın katsayısı ise güneşin doğudan batıya



Şekil 3. 21.03.2011 tarihinde Doğrusal Yönseme Yüzeyi Parametre Kestirimleri a) \hat{a}_1 , b) \hat{a}_2 , c) \hat{a}_3

doğru olan hareketine göre değişim göstermektedir.

Her bir katsayı kestirimi için KAPA yöntemi kullanılarak GAD süreleri hesaplanmıştır. GAD süreleri hesaplanırken kestirilen TEİ değerleri ve KAPA yöntemi ile hesaplanan ortalama değerler arasındaki hata (7) ve (8) ile gösterilen hata fonksiyonları ile hesaplanmıştır. Burada $\hat{m}_{r;k}(N_w)$, N_w uzunluğunda kayan pencere kullanılarak k . parametre için hesaplanan birinci moment kestirimi iken $\hat{m}_{p;k}(N_w)$ ise N_w uzunluğunda kayan pencere kullanılarak k . parametre için hesaplanan ikinci moment kestirimini ifade eder. \hat{a}_k ise k . parametre kestirim vektörünü tanımlar.

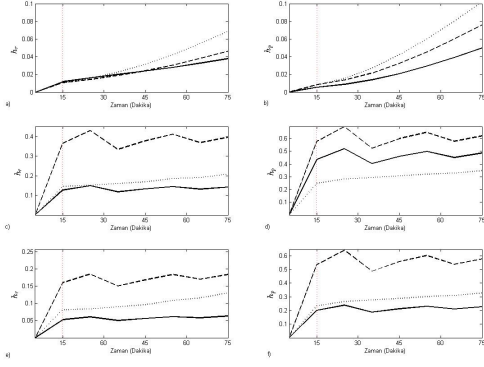
$$h_r(N_w) = \frac{\|\hat{\mathbf{a}}_k - \hat{m}_{r;k}(N_w)\|_2^2}{\|\hat{\mathbf{a}}_k\|_2^2} \quad (7)$$

$$h_p(N_w) = \frac{\|\hat{\mathbf{a}}_k^2 - \hat{m}_{p;k}(N_w)\|_2^2}{\|\hat{\mathbf{a}}_k^2\|_2^2} \quad (8)$$

Şekil 4'de günlük, yıllık ve üç yıllık doğrusal model parametre kestirimleri kullanılarak hesaplanan GAD süreleri gösterilmiştir. Şekil 4a, 4c ve 4e sırasıyla günlük, yıllık ve üç yıllık İONOLAB-TEİ değerleri kullanılarak birinci momentin değişmeden kaldığı süreyi gösterirken; Şekil 4b, 4d ve 4f ikinci momentin değişmeden kaldığı süreyi gösterir. İyonkürenin her durumu için yönsemenin GAD süresi 15 dakika olarak gözlemlenmiştir.

V. SONUÇ

Bu çalışmada Türkiye üzerinde ilk defa iyonküre doğrusal yönseme kestirimi çıkartılarak istatistiksel olarak analiz yapılmıştır. İlk aşamada UKTA yöntemi ile TUSAGA-Aktif YKS alıcılarından kestirilen TEİ değerleri kullanılarak, düzgün ve sık veri seti oluşturulmuştur. Bu veri seti kullanılarak her beş dakikada bir Türkiye ve KKTC üzerinde iyonkürenin yönseme modelinin parametreleri kestirilmiştir. Parametre kestirimleri üzerine KAPA yöntemi ile GAD süreleri belirlenmiştir. Bunun sonucunda Türkiye için her durumda iyonküre yönseme modelinin durağanlık süresinin 15 dakika olduğuna ulaşılmıştır. TÜBİTAK 109E055 projesi kapsamında yapılan çalışmalarda, orta enlem üzerinde iyonkürenin sakin günlerinde GAD süresi 15 dakikaya kadar uzarken, fırtınalı ve



Şekil 4. Düzgelenmiş hata oranları, a_1 (—), a_2 (- -), a_3 (···) a) 21.03.2011 günü için birinci moment, b) 21.03.2011 günü için ikinci moment, c) 2011 yılı için birinci moment, d) 2011 yılı için ikinci moment, e) 2009-2011 yılları için birinci moment, f) 2009-2011 yılları için ikinci moment

bozunmalı günlerde ise 2.5 dakikaya kadar inmektedir. Türkiye üzerinde TEİ'nin GAD süresinin ortanca değeri ise 7.5 dakika olarak belirlenmiştir [3]. Yapılan iki çalışma sonucunda sakin günlerde iyonküre rassal modelinin yönseme fonksiyonuna yaklaştığı, fırtınalı günlerde rassal kalıntı fonksiyonundaki ani değişimlerden dolayı GAD süresinin önemli ölçüde azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

TEŞEKKÜR

TÜBİTAK EEEAG 109E055 ve 110E296 numaralı projeleri tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Y. Moon, "Evaluation of 2-Dimensional Ionosphere Models for National and Regional GPS Networks in Canada," Master Tezi, The University of Calgary, Alberta, Canada, 2004.
- [2] S. Schaer, "Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System," Doktora Tezi, Astronomical Institute, University of Bern, Bern, Switzerland, 1999.
- [3] F. Arıkan, C.B. Erol, O. Arıkan, "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data," *Journal of Geophysical Research*, 108(A12), 1469-1480, 2003.
- [4] F. Arıkan, C.B. Erol, O. Arıkan, "Regularized estimation of vertical total electron content from GPS data for a desired time period," *Radio Sci.*, 39, RS6012, 2004.
- [5] F. Arıkan, H. Nayir, U. Sezen, O. Arıkan, "Estimation of Single Station Inter-frequency Receiver Bias Using GPS-TEC," *Radio Sci.*, 43, RS4004, doi:10.1029/2007RS003785, 2008a.
- [6] H. Nayir, F. Arıkan, O. Arıkan, C.B. Erol, "Total Electron Content Estimation with Reg-Est," *J. Geophys. Res.*, 112, A11313, doi:10.1029/2007JA012459, 2007a.
- [7] I. Sayın, F. Arıkan, O. Arıkan, "Regional TEC Mapping with Random Field Priors and Kriging," *Radio Sci.*, 2(1), 43, doi:10.1029/2007RS003786, 2008.
- [8] Y.E. Gökdağ, F. Arıkan, C. Toker, and O. Arıkan, "Sentetik TEİ yüzeyleri için parçacık sürü optimizasyonu ile parametre kestirimi," SIU 2013, Özyeğin Üniversitesi, Lykia-World, Fethiye, Muğla, Türkiye, 18-20 Nisan 2012.
- [9] C. Toker, Y.E. Gökdağ, F. Arıkan, and O. Arıkan, "Application of Modified Particle Swarm Optimization Method for Parameter Extraction of 2-D TEC Mapping," European Geophysical Union, EGU General Assembly 2012, Viyana, Avusturya, 22-27 Nisan 2012.
- [10] O. Köroğlu, "TUSAGA ve TUSAGA-Aktif Ağı Verileri ile Toplam Elektron İçeriğinin İstatistiksel Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.

- [11] F. Arıkan, C.B. Erol, O. Arıkan, "Statistical Characterization of Time Variability in Midlatitude Single-Tone HF Channel Response," *Radio Sci.*, 39, RS01889, 1429-1443, 1998.
- [12] S. Karatay, "Deprem ile İyonküre Toplam Elektron İçeriği Arasındaki İlişkinin Araştırılması," Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, TÜRKİYE, 2010.
- [13] N. Türel, "İyonosfer Katmanının Toplam Elektron İçeriğinin İzgel Güç Yoğunluğu ve Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu Kestirimi," Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE, 2008.