

IONOLAB Tekniği ile İyonosfer Toplam Elektron İçeriği Kestirimi

Ionospheric Total Electron Content Estimation Using IONOLAB Method

Halil Nayir, Feza Arıkan, Cemil B. Erol, Orhan Arıkan

Aselsan A.Ş., Ankara
hnyayir@aselsan.com.tr

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, Ankara
arikan@hacettepe.edu.tr

TÜBİTAK – İLTAREN, Ankara
cemil.erol@iltaren.tubitak.gov.tr

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bilkent Üniversitesi, Ankara
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

Özetçe

Kısa dalga ve uydu haberleşme sistemleri için büyük öneme sahip olan iyonosfer katmanının karakteristiğinin gözlenebileceği önemli parametrelerden biri Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. Yerküresel Konumlama Sistemi (YKS), TEİ kestirimi için doğrudan ve fazla maliyet gerektirmeden kullanılabilir. Düzgünleştirilmiş TEİ Kestirim Yöntemi (D-TEİ) ile 10°'nin üstünde yükseklik açısına sahip uydulardan 30 s aralıklarla alınan ölçümler kullanılarak gürbüz ve yüksek çözünürlüklü TEİ kestirimi yapılabilir. Bu çalışma kapsamında iyonosfer yüksekliği, ağırlık fonksiyonu, alıcı-uydu yanlılıkları gibi D-TEİ yöntemi içinde kullanılan parametrelerin yonteme etkisi incelenmiştir. D-TEİ nin iyonosfer yüksekliğinin seçiminden bağımsız olarak gürbüz kestirim yapabileceği gösterilmiştir. D-TEİ içinde kullanılacak ağırlık fonksiyonlarından iyonosferden kaynaklan-ması beklenmeyen gürlütü etkilerini en aza indiren ağırlık fonksiyonu seçilmiştir. Bu çalışmada D-TEİ yöntemi içinde alıcı ve uydu yanlılıklarının uygun biçimde kullanılması ile IGS analiz merkezlerinin kestirimlerine oldukça yakın TEİ değerleri elde edilmiştir. Veri seti faz ölçümlerini de içerecek biçimde genişletilmiştir. Geliştirilmiş D-TEİ yöntemi ile faz ya da sözde menzil değerlerinden yüksek çözünürlüklü, gürbüz TEİ kestirimleri elde edilebilmektedir.

Abstract

Ionosphere which is an important atmospheric layer for HF and satellite communications, can be investigated through Total Electron Content (TEC). Global Positioning System provides cost-effective means for TEC estimation. Regularized TEC estimation method (D-TEI) is developed to estimate high resolution, robust TEC values. The method combines measurements of GPS satellites above 10° elevation limit and estimates can be obtained with 30 s time resolution. In this paper, parameters that are used in D-TEI method such as ionospheric height, weighting function, and satellite receiver biases are studied. It is found that TEC estimation results of D-TEI method is almost independent of ionospheric height. Different weighting functions are tried and the weighting function that minimizes non-ionospheric effects is selected. By using satellite and receiver biases in the correct form consistent TEC estimation results are obtained with IGS

analysis centers. In this paper, the method is improved to include phase measurements. Taking either pseudorange or phase measurements as input, high resolution, robust TEC estimates are obtained using D-TEI method.

1. Giriş

İyonosfer yeryüzünden yaklaşık 60 km ile 1100 km arasında yükseklikte yer alan ve güneş ışınları ile iyonize olmuş gazlardan oluşan atmosfer tabakasıdır [1]. İyonosferin radyo dalgalarına etkisi iyonosferdeki elektron yoğunluğuna bağlıdır. İyonosferdeki değişkenliğinin gözlenebileceği parametrelerden biri Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. TEİ 1 m² kesitli bir silindir boyunca toplam serbest elektron miktarı olup TECU birimi ile ifade edilir. 1 TECU, 10¹⁶ el/m²'dir. İyonosferin yüksek elektron yoğunluğuna sahip yapısı YKS işaretlerinde frekansa bağlı kırılmaya ve alıcıda gecikmeye neden olur. YKS işaretlerindeki iyonosfere bağlı gecikme TEİ'nin bir fonksiyonudur. TEİ konum, zaman ve frekans gibi etkenlere bağlıdır.

F. Arıkan, C.B. Erol ve O. Arıkan tarafından geliştirilen Düzgünleştirilmiş TEİ kestirim yöntemi (D-TEİ) ile 10°'nin üstünde yükseklik açısına sahip uydulardan alınan 30 s çözünürlüğündeki sözde menzil ölçümleri kullanılarak TEİ kestirimi yapılabilir [1],[2]. Bu teknik, uydulardan hesaplanan VTEC değerlerinin en az kareler yöntemi ile birleştirilerek TEİ kestirimlerinin yapılmasına dayanır. D-TEİ kestirim yöntemi [1],[2] çalışmalarında çeşitli gün ve istasyonlara uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer TEİ kestirim yöntemi sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. [3]'te iyonosferik bozulmalarının yüksek olduğu 27-31 Ekim 2003 tarihlerinde çeşitli gün ve istasyonlar için D-TEİ yöntemi ile TEİ kestirim çalışmaları yapılmış, yöntem içinde kullanılan düzgünleştirme parametre setinin kararlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışma kapsamında D-TEİ yöntemi içinde kullanılan iyonosfer yüksekliği, ağırlık fonksiyonu ve alıcı uydu yanlılıkları gibi parametrelerin TEİ kestirimine etkisi incelenmiştir. Önceki çalışmalarda D-TEİ içinde sadece sözde menzil ölçümleri kullanılmakta iken yöntem faz verilerini de içerecek biçimde geliştirilmiştir.

2. D-TEİ Kestirim Parametreleri

TEİ kestirim yöntemine çeşitli parametrelerin etkisinin incelenmesi ve en uygun parametrelerin tespit edilmesi için mümkün olduğunca çeşitlilik içeren gün ve istasyonların seçilmesi hedeflenmiştir. İncelenen günler 2003 yılı Ekim ayı içindeki ionosferin sakin günleri ve bozulmanın olduğu günlerdir. İyonosferin sakin ve problemlı günlerine ait bilgiler Ionospheric Dispatch Center'den (IDCE) alınmıştır [4]. Ayrıca Kp, Dst indisleri ve güneş lekesi sayıları incelenerek ionosferin durumu hakkında bilgi edinilebilir. IDCE'den alınan verilere göre 27, 28, 29 Ekim 2003 ionosferde pozitif bozulmanın olduğu, 30-31 Ekim 2003 negatif bozulmanın olduğu günlerdir. 10 Ekim 2003 ise sakin bir gündür. Özellikle 30-31 Ekim tarihlerinde Kp indisi 9'a kadar yükselmiştir. Bu durum şiddetli bir geomanyetik fırtınanın olduğu göstermektedir. İncelenen istasyonlar dünyanın orta enlem, yüksek enlem ve ekvatorial bölgelerindeki çeşitli istasyonlardan seçilmiştir. İncelenen istasyonların listesi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: İncelenen istasyonların koordinatları

Alıcı İstasyon	Ülke	Enlem °	Boylam °
Ankara	Türkiye	39,53 K	32,45 D
Brüksel	Belçika	50,47 K	4,21 D
Graz	Avusturya	47,04 K	15,29 D
İstanbul	Türkiye	41,06 K	29,01 D
Zelenchukskaya	Rusya	43,17 K	41,33 D
Artı	Rusya	56,25 K	58,33 D
Kiruna	İsveç	67,51 K	20,58 D
Metsahovi	Finlandiya	60,13 K	24,41 D
Petropavlosk	Rusya	53,04 K	158,36 D
Lae	Papua Yeni Gine	06,40 G	146,59 D
Manila	Filipinler	14,38 K	121,04 D
Nanyang	Singapur	01,20 K	103,40 D

2.1. İyonosfer Yüksekliğinin TEİ Kestirimine Etkisi

Uydulardan alınan sözde menzil ölçümleri kullanılarak alıcı ile uydu arasındaki yol boyunca toplam elektron miktarı (STEC) Eş. 1'deki gibi hesaplanabilir. Eş. 1'de P değeri f_1 ve f_2 frekanslı işaretler için sözde menzil farkını, u alıcı istasyonu, m uydu numarasını, n ölçüm zamanını, DCB_m diferansiyel alıcı yanlışlığını, DCB_u diferansiyel uydu yanlışlığını göstermektedir. A sabit olup değeri $40,3 \text{ m}^3/s^2$ dir.

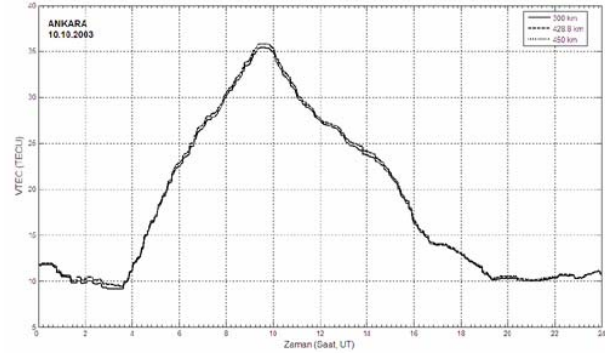
$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [P_{4,u}^m(n) + c(DCB_m + DCB_u)] \quad (1)$$

D-TEİ yöntemi içinde kullanılan parametrelerden biri ionosfer yüksekliğidir. D-TEİ modeli Tek Katman İyonosfer modelini kullanmaktadır. Bu modele göre ionosfer sonsuz incelikle bir tabakadan oluşmakta olup bu katmanın yeryüzünden yüksekliği ionosfer yüksekliğidir. Tek katman ionosfer modeline göre bir izdüşüm fonksiyonu yardımıyla Eş. 1'de hesaplanan STEC kullanılarak alıcıya göre dik doğrultudaki TEİ (VTEC) değeri Eş. 2'deki gibi hesaplanabilir. Eş. 3'deki ε uyduların alıcıya göre yükseklik açısı, h ionosfer yüksekliği, R dünyanın yarıçapıdır.

$$VTEC_u^m(n) = STEC_u^m(n) / M(\varepsilon_m(n)) \quad (2)$$

$$M(\varepsilon_m(n)) = \left[1 - \left(\frac{R \cos \varepsilon_m(n)}{R + h} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (3)$$

D-TEİ yönteminde ionosfer yüksekliği olarak 428,8 km seçilerek kullanılmıştır. Bu yükseklik seçildiğinde izdüşüm fonksiyonu ve Chapman Profili arasında en iyi uyum sağlanmaktadır [8]. Literatürdeki çalışmalarda ise 300 km ile 450 km arasında ionosfer yükseklikleri seçilerek kullanılabilir [5],[7],[8]. Bu çalışma kapsamında ionosfer yüksekliğinin D-TEİ yöntemi ile yapılan TEİ kestirimlerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Şekil 1'de Ankara istasyonu 10.10.2003 günü için 300 km, 428,8 km ve 450 km ionosfer yükseklikleri için elde edilen TEİ kestirimleri verilmiştir. Şekil 1'de 300 km ile 428,8 km ionosfer yükseklikleri kullanılarak elde edilen TEİ kestirimleri arasındaki en yüksek fark 0,52 TECU, 428,8 km ile 450 km ionosfer yükseklikleri kullanılarak elde edilen TEİ kestirimleri arasındaki en yüksek fark 0,08 TECU'dur. Sonuç olarak farklı ionosfer yükseklikleri için elde edilen TEİ kestirim değerleri birbirine oldukça yakındır.



Şekil 1. Ankara 10.10.2003 için ionosfer yüksekliği etkisi

Eş. 4, Eş. 5 ve Eş. 6'da ionosfer yüksekliğinden kaynaklanan TEİ kestirim farkları hesaplanmıştır. \tilde{x} değeri D-TEİ ile elde edilen TEİ kestirimleridir. h_1, h_2, h_3 sırasıyla 300 km, 428,8 km ve 450 km ionosfer yüksekliğini göstermektedir. N toplam ölçüm sayısıdır. $Err_1, Err_2,$ ve Err_3 fark değerleri çeşitli gün ve istasyonlar için hesaplanarak Tablo 2'de verilmiştir.

$$Err_1 = \frac{\sum_{n=1}^N |\tilde{x}(h_3) - \tilde{x}(h_2)|^2}{\sum_{n=1}^N |\tilde{x}(h_2)|^2} \quad (4)$$

$$Err_2 = \frac{\sum_{n=1}^N |\tilde{x}(h_2) - \tilde{x}(h_1)|^2}{\sum_{n=1}^N |\tilde{x}(h_2)|^2} \quad (5)$$

$$Err_3 = \frac{\sum_{n=1}^N |\tilde{x}(h_3) - \tilde{x}(h_1)|^2}{\sum_{n=1}^N |\tilde{x}(h_2)|^2} \quad (6)$$

Tablo 2'de görüldüğü gibi ionosferin sakin ve problemlı günleri için ionosfer yüksekliğine bağlı fark değerleri az olduğundan TEİ kestirimleri ionosfer yüksekliğinden oldukça az etkilenmektedir.

Tablo 2: Çeşitli istasyonlar için ionosfer yüksekliğine bağlı TEİ kestirim hataları

YKS İstasyonu	Gün	Err ₁	Err ₂	Err ₃
Zelenc.	10.10.2003	3,40x10 ⁻⁶	1,39x10 ⁻⁴	1,86x10 ⁻⁴
Zelenc.	28.10.2003	3,62x10 ⁻⁶	1,48x10 ⁻⁴	1,98x10 ⁻⁴
Ankara	10.10.2003	4,24x10 ⁻⁶	1,71x10 ⁻⁴	2,29x10 ⁻⁴
Ankara	31.10.2003	5,83x10 ⁻⁶	2,38x10 ⁻⁴	3,15x10 ⁻⁴
Mets.	10.10.2003	5,33x10 ⁻⁶	2,19x10 ⁻⁴	2,92x10 ⁻⁴
Mets	28.10.2003	4,69x10 ⁻⁶	1,92x10 ⁻⁴	2,57x10 ⁻⁴
Arti	10.10.2003	4,19x10 ⁻⁶	1,71x10 ⁻⁴	2,29x10 ⁻⁴
Arti	31.10.2003	3,86x10 ⁻⁶	1,58x10 ⁻⁴	2,11x10 ⁻⁴
Manila	10.10.2003	4,88x10 ⁻⁶	1,97x10 ⁻⁴	2,64x10 ⁻⁴
Manila	28.10.2003	5,26x10 ⁻⁶	2,13x10 ⁻⁴	2,85x10 ⁻⁴
Nanyang	10.10.2003	4,74x10 ⁻⁶	1,94x10 ⁻⁴	2,59x10 ⁻⁴
Nanyang	30.10.2003	5,20x10 ⁻⁶	2,13x10 ⁻⁴	2,84x10 ⁻⁴

2.2. Ağırlık Fonksiyonunun TEİ Kestirimine Etkisi

D-TEİ kestirim yöntemi içinde ufka yakın uydulardan alınan işaretlerde görülen çok-yol etkisinin azaltılması için ölçümler, seçilen bir ağırlık fonksiyonu ile ağırlıklandırılır. Bu çalışma kapsamında denenen çeşitli ağırlık fonksiyonları aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

1. Ağırlık Fonksiyonu :

$$w_m(n) = \begin{cases} 0, & \varepsilon_m(n) \leq 10^\circ \\ \exp\left(-\frac{(90 - \varepsilon_m(n))^2}{2\sigma^2}\right), & 10^\circ \leq \varepsilon_m(n) \leq 60^\circ \\ 1, & 60^\circ \leq \varepsilon_m(n) \leq 90^\circ \end{cases} \quad (7)$$

2. Ağırlık Fonksiyonu :

$$w_m(n) = \begin{cases} 0, & \varepsilon_m(n) \leq 10^\circ \\ \exp\left(-\frac{(60 - \varepsilon_m(n))^2}{2\sigma^2}\right), & 10^\circ \leq \varepsilon_m(n) \leq 60^\circ \\ 1, & 60^\circ \leq \varepsilon_m(n) \leq 90^\circ \end{cases} \quad (8)$$

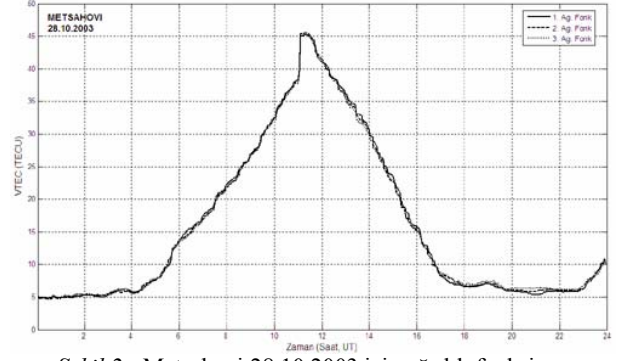
3. Ağırlık Fonksiyonu :

$$w_m(n) = \sin^2(\varepsilon_m(n)) \quad (9)$$

Şekil 2'de her üç ağırlık fonksiyonu ile elde edilen TEİ kestirimler verilmiştir. Yapılan çalışmalarda 2. ve 3. ağırlık fonksiyonları ile elde edilen TEİ kestirimleri birbirine oldukça yakındır. 2. ve 3. ağırlık fonksiyonları ile elde edilen kestirimlerde iyonosferden kaynaklanması beklenmeyen gürültü etkileri 1. ağırlık fonksiyonuna göre daha azdır.

2.3. Yanlılık Ekleme Yöntemleri

Yanlılıklar, alıcı ve uydu donanımlarından kaynaklanan frekansa bağımlı zaman hatalarıdır. TEİ kestiriminin yapılabilmesi için bu hataların ölçümlerden doğru biçimde çıkarılması gerekmektedir. Yanlılık değerleri uydular ve bazı alıcılar için çeşitli analiz merkezleri tarafından hesaplanmaktadır. Yanlılıkların TEİ hesaplarında kullanımı



Şekil 2. Metsahovi 28.10.2003 için ağırlık fonksiyonu etkisi

konusunda literatürde net bir yaklaşıma rastlanmadığı için iki yöntem denenmiştir. Birinci yöntem yanlılıkların STEC hesaplarken eklenmesidir. Eş. 10'da görüldüğü gibi bu yöntemde alıcı ve uydu yanlılıkları STEC hesaplanırken zaman (s) birimi ile eklenmektedir. İkinci yöntem ise yanlılıkların VTEC hesaplarken eklenmesidir. Eş. 11'de uydu yanlılığı b_m ve alıcı yanlılığı b_u , VTEC hesaplanması sırasında TECU birimine çevirilerek eklenmektedir.

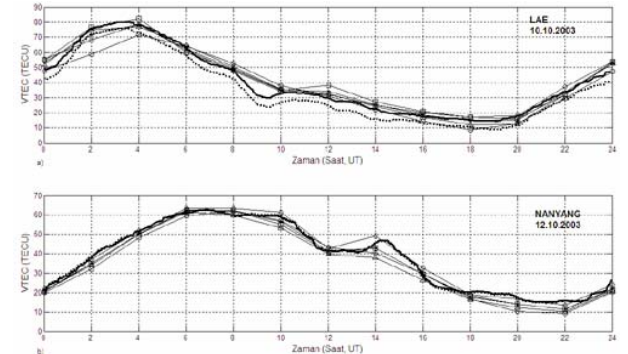
1. Yanlılık ekleme yöntemi :

$$STEC_u^m(n) = \frac{1}{A} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \left[P_{4,u}^m(n) + c(DCB_m + DCB_u) \right] \quad (10)$$

2 Yanlılık ekleme yöntemi :

$$VTEC_u^m(n) = STEC_u^m(n) / M(\varepsilon_m(n)) + b_m + b_u \quad (11)$$

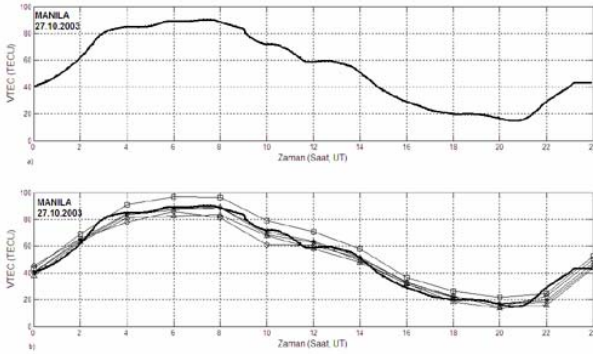
Şekil 3a'da ekvatorial bölgede yer alan Lae ve Nanyang istasyonları için her iki yanlılık ekleme yöntemi ile elde edilen TEİ kestirimler verilmiştir. Şekil 3b'de her iki yöntem ile elde edilen kestirimler IGS analiz merkezlerinin sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. 1. yanlılık ekleme yöntemi ile elde edilen kestirimler düz çizgi ile, 2. yanlılık ekleme yöntemi ile elde edilen kestirimler kesik çizgi gösterilmiştir. IGS analiz merkezlerinden JPL tarafından verilen kestirimler elmas, CODE tarafından verilen kestirimler kare, ESA tarafından verilen kestirimleri daire, UPC tarafından verilen kestirimler üçgen biçiminde gösterilmiştir. Şekil 3b'de 1. yanlılık ekleme yöntemi ile elde edilen kestirimlerin IGS analiz merkezleri ile daha uyumlu olduğu görülmektedir. 1. Yanlılık ekleme yöntemi, Eş. 1'de verilen TEİ gözlem modeline daha uygun olduğundan D-TEİ yöntemi içinde 1. yanlılık ekleme yöntemi kullanılacaktır.



Şekil 3. Ekvatorial bölge istasyonları için yanlılık ekleme yöntemleri etkileri

3. Faz Ölçümlerinin TEİ Kestiriminde Kullanılması

Önceki çalışmalarda D-TEİ yöntemi içinde sadece sözde menzil ölçümleri girdi olarak kullanılmıştır [1,2,3]. Sözde menzil gürültü etkisi görülebilir. Faz ölçümlerinde gürültü etkisi azdır fakat ilk faz belirsizliği ve faz kopmaları nedeniyle sadece faz ölçümlerini kullanarak TEİ kestirimi yapmak zordur. Sadece sözde menzil ve sadece faz ölçümlerinin kullanımı dışında üçüncü bir yöntem sözde menzil ve faz ölçümlerini birlikte kullanmaktır. Bu yöntemde faz ölçümleri sözde menzil ölçümleri ile seviyelendirilerek kullanıldığında ilk faz belirsizliği giderilir. Bunun için faz ölçümlerinde kopmaların olmadığı zaman dilimleri boyunca sözde menzil ölçümlerinin ortalamaları alınarak faz ölçümlerine eklenir. Böylece faz ölçümleri için uygun seviyelendirme sağlanmış olur. Şekil 4a'da Manila istasyonu 27.10.2003 günü için sözde menzil ve faz verilerinden elde edilen TEİ değerleri verilmiştir. Şekil 4b'de her iki yöntem ile elde edilen kestirimler IGS analiz merkezlerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. 1. yanlışlık ekleme yöntemi ile elde edilen kestirimler düz çizgi ile, 2. yanlışlık ekleme yöntemi ile elde edilen kestirimler kesik çizgi gösterilmiştir. IGS analiz merkezlerinden alınan veriler Şekil 3'teki gösterimlerle aynıdır. Şekil 4a'da görüldüğü gibi sözde menzil ya da faz ölçümlerinden elde edilen TEİ kestirimleri hemen hemen aynıdır. Her iki veri seti ile elde edilen TEİ kestirimleri IGS analiz merkezleri ile özellikle de JPL ile tutarlıdır.



Şekil 4. Manila istasyonu 27.10.2003 için faz verilerinden TEİ kestirimi çalışması

4. Sonuçlar

Yapılan çalışmalarda incelenen çeşitli gün ve istasyonlar için düzgünleştirme yöntemi denenmiş, ionosferin problemleri olduğu günlerde bile yüksek çözünürlüklü TEİ kestirimi yapılabilmektedir. Düzgünleştirilmiş TEİ kestirimi sonuçlarının IGS analiz merkezlerinin sonuçları ile, özellikle JPL ile uyumlu olduğu görülmüştür. IGS merkezlerinden alınan sonuçlar 2 saat çözünürlüğünde iken düzgünleştirme yöntemi ile 30 saniye çözünürlüklü TEİ kestirimleri yapılabilmektedir. Böylece ionosferdeki ani değişimler daha hassas incelenebilir. Sözü edilen düzgünleştirme yöntemi ile sözde menzil ölçümlerinden olduğu gibi faz ölçümlerinden hesaplanan TEİ değerlerinden de kestirim yapılabildiği gösterilmiştir. İyonosfer yüksekliğinin farklı değerlerde seçilmesinin, TEİ kestirimlerini çok az etkilediği görülmüştür. Ağırlık fonksiyonlarının TEİ kestirimine etkisi incelenmiş, yöntemde kullanılmaya elverişli olacak ağırlık fonksiyonu saptanmıştır. TEİ kestirimi yaparken alıcı ve uydu yanlışlıklarının nasıl kullanılacağı bu çalışmada anlatılmış,

yanlılıkların eklenmesi için YKS gözlem modeli ve ionosfer modeline uygun bir yol belirlenmiştir. Faz verilerinden TEİ kestirimi de yapılmıştır. Faz ve sözde menzil verilerinden elde edilen TEİ kestirim değerleri birbirleri ile karşılaştırılmış, her iki yöntem ile elde edilen kestirim değerlerinin uyum içinde olduğu ve D-TEİ yönteminin hem çok gürültülü hem de az gürültülü veriler için gürbüz kestirimler ürettiği gözlenmiştir. Bu çalışmalar ile geliştirilen D-TEİ yöntemi İONOLAB yöntemi olarak adlandırılacaktır.

5. Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK EEEAG 105E171 projesi kapsamında desteklenmektedir. Yazarlar Hacettepe Üniversitesi öğretim üyelerinden Umut Sezen'e ve proje çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederler.

6. Kaynakça

- [1] Arıkan, F., Erol, C.B., Arıkan, O., "Regularized Estimation of Vertical Total Electron Content from Global Positioning System Data", *Journal of Geophysical Research*, (118) 1469-1480, 2003.
- [2] Arıkan, F., Erol, C.B., Arıkan, O., "Regularized Estimation of Vertical Total Electron Content from GPS Data for a Desired Time Period", *Radio Science*, 39:RS6012, 2004.
- [3] Arıkan, F., Erol, C.B., Arıkan, O., "Regularized Estimation of TEC from GPS Data for Certain Midlatitude Stations and Comparisons with IRI Model", *Advances in Space Research*, yayınlanmak üzere kabul edilmiştir, Aralık 2006.
- [4] Ionospheric Dispatch Center.
http://www.cbk.waw.pl/rwc/q_d_days.ctl
- [5] Lanyi, G.E., Roth, T., "A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations", *Radio Science*, (23) 483-492, 1988.
- [6] Ma, G., Maruyama, T., "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan", *Annales Geophysicae*, (21) 2083-2093, 2003.
- [7] Otsuka, Y., Ogawa, T., Saito, A., Tsugawa, T., Fukao, S., Miyazaki, S., "A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan", *Earth Planets Space*, (54) 63-70, 2002.
- [8] Schaer, S., "Mapping and Predicting the Earth's Ionosphere Using the Global Positioning System", Doktora Tezi, University of Bern, İsviçre, 1999.