



TEK FREKANSLI GNSS ALICILARINDA KULLANILAN İYONOSFERİK ETKİ DÜZELTME MODELLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

¹Muzaffer KAHVECİ , ¹Damla ALİOĞLU , ²Güray ÇETİN 

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE

²Technische Universität, Berlin, ALMANYA

¹mkahveci@ktun.edu.tr, ²damlalioglu@hotmail.com, ³hrt.guray@gmail.com

(Geliş/Received: 29.12.2020; Kabul/Accepted in Revised Form: 02.02.2021)

ÖZ: Uydularla konum belirleme ve navigasyon (GNSS) uygulamalarında, Seçimli Doğruluk Erişimi (SA: Selective Availability) gibi kasıtlı bozular haricinde, en önemli hata kaynaklarından birisi iyonosferdir. İyonosferde atomlardan kopmuş serbest elektronların sayısı elektromanyetik dalgaların yayılmasını değiştirmeye yetecek kadar çoktur. İyonosferik etki, bu serbest elektronlar nedeniyle, uydu kod ölçülerinde gecikmeye, faz ölçülerinde ise hızlanmaya neden olmaktadır. Diğer taraftan iyonosferik etki frekans bağımlıdır. GNSS alıcılarının çok frekanslı olmasının en temel nedenlerinden birisi iyonosferik etkinin frekans bağımlı olması ve bu özellikten yararlanarak büyük oranda giderilebilmesidir. Ancak, tek frekanslı alıcılarda iyonosferik etkinin bu yöntemle giderilmesi olanağı bulunmamakta, bunun yerine navigasyon mesajları içerisinde yayınlanan iyonosferik model katsayıları kullanılarak giderilebilmektedir. Bu bağlamda, genelde gerçek zamanlı uygulamalar ve tek frekanslı alıcılar için örneğin GPS navigasyon mesajlarında Klobuchar iyonosfer modeli katsayıları da yayınlanmaktadır. Bu model ile iyonosferik etkinin yaklaşık %50'sinin giderilebilmesi olanaklıdır. Diğer taraftan, Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (ITU) tarafından günümüz uydu sistemleri ve tek frekanslı alıcılar için önerilen NeQuick modeli kullanılarak da iyonosferik etkiler %70 oranında giderilebilmektedir. Bu çalışmada, Klobuchar ve NeQuick modellerine ilişkin algoritmalar kullanılarak iyonosferik etki hesapları yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile söz konusu model algoritmalarının, zaman içerisinde Türkiye'de de üretilmesinin kaçınılmaz olduğuna inanılan yerli ve millî tek frekanslı GNSS alıcı yazılımlarında gerçek zamanlı mutlak konum belirleme amaçlı olarak kolaylıkla uyarlanabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: GNSS, İyonosfer, Klobuchar, NeQuick, TEC

Comparison of Ionospheric Correction Models Applied in Single Frequency GNSS Receivers

ABSTRACT: Ionosphere is one of the most important error sources in GNSS positioning and navigation applications, except for deliberate disruptions such as Selective Availability. The number of free electrons detached from atoms in the ionosphere is large enough to change the propagation of electromagnetic waves. The ionospheric effect causes delay in GNSS code measurements (group delay) and acceleration in phase measurements (phase advance) due to these free electrons. One of the main reasons why GNSS receivers are multi-frequency is that the ionospheric effect is frequency dependent and can be largely eliminated by taking advantage of this feature. However, it is not possible to eliminate the ionospheric effect in single frequency receivers with multi-frequency method, instead it can be eliminated by using the ionospheric model coefficients broadcast in the navigation messages. In this context, Klobuchar ionosphere model coefficients are also broadcast for real-time applications and single frequency receivers, for example in GPS navigation messages. With this model, it is possible to eliminate approximately 50%

of the ionospheric effect. On the other hand, ionospheric effects can be eliminated by 70% using the NeQuick model recommended by International Telecommunication Union (ITU) for today's satellite systems and single frequency receivers. In this study, Ionospheric effect computations were performed using Klobuchar and NeQuick algorithms and the obtained results were compared. With this research, it has been concluded that both algorithms can be adapted in any "local and national" GNSS receiver firmware to be manufactured in future in Turkey.

Key Words: GNSS, Ionosphere, Klobuchar, NeQuick, TEC

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Uydularla konum belirlemede (GNSS) ile konum belirleme ve navigasyon uygulamalarında, elde edilen konum doğruluklarını etkileyen çok sayıda hata kaynağı vardır. Bunlar çok genel olarak; atmosferik ve çevresel ortama, cihaza, ölçü yöntemine ve uduya bağlı hatalar şeklinde sınıflandırılabilir. Bu hata kaynaklarından atmosferden kaynaklanan hatalar iyonosferik ve troposferik hatalar olarak ifade edilebilir (Kahveci ve Yıldız 2018). Ölçü ve hesap sonuçlarını olumsuz etkileyen bu hata kaynaklarının neden oldukları hataların çoğu ölçü yöntemi veya modelleme ile büyük oranda giderilebilmektedirler. Uydudan gelen sinyaller atmosferin farklı katmanlarından geçerek alıcıya ulaşmaktadır. Sinyal bu yolculuk boyunca iyonosfer ve troposfer tabakalarından geçmekte ve bu tabakalardan geçtiğinde farklı etkilere maruz kalmaktadır.

Troposfer, havanın yeryüzü ile temas halinde olan en alt tabakasıdır. Kalınlığı kutuplarda yaklaşık olarak 8 km, ekvatorunda 18 km'dir. Troposfer tabakası dağıtıcı bir özelliğe sahip olmadığı için troposferik etki uydu sinyali frekansına bağımlı değildir. Bu nedenle, troposferin faz ve kod ölçülerine olan etkisi aynı büyüklüktedir ve GNSS alıcılarının ikili (çoklu) frekans özelliğinden yararlanarak giderilmesi olanaklı değildir (Kahveci 1997).

İyonosfer, atmosferin Güneş ışınımı sonucu iyonize olmuş, yüksek yoğunlukta serbest elektron içeren, hava moleküllerinin ileri derecede yoğunlaşmış halde bulunduğu ve elektrik iletkenliği kazandığı, elektromanyetik dalgaları yansıtacak miktarda iyonların ve serbest elektronların bulunduğu yeryüzünden yaklaşık 50 km ile 1000 km arasında yükseklikte bulunan atmosferik tabakadır (Klobuchar 1987, Klobuchar ve Doherty 1990). İyonosferin güneşe göre olan konumu zamanla değiştiğinden iyonlaşma miktarı da zamana göre değişmektedir. Gündüzleri güneş ışınları ile atomlar ve moleküller elektron ve iyonlara ayrılırlar, dolayısıyla gündüzleri serbest elektron miktarı daha fazladır. Güneş lekeleri sayısı (Sun Spot Number) ve güneş patlamaları, güneş ışınım seviyesini dolayısıyla iyonlaşmayı ve iyonosferdeki serbest elektron miktarını önemli ölçüde etkiler (URL1). İyonosferdeki bu serbest elektronlar ise radyo dalgalarının yayılımını etkilemektedir. İyonosfer tabakasında bulunan serbest elektronlar ve iyonlar iyonosfer tabakasında dağıtıcı bir ortam özelliği oluşturmaktadır. Bir ortamın kırıcılığı, içinden geçen elektromanyetik dalganın frekansına bağlı ise ortamın dağıtıcı olduğundan söz edilebilir. Dolayısıyla, iyonosferik etkinin büyüklüğü uydu sinyali frekansına, zamana, konuma, mevsime ve güneş radyasyon hareketlerine bağlı olarak değişim gösterir. Başka bir ifadeyle, iyonosfer tabakası troposfer tabakasının aksine farklı frekanslarda farklı farklı etkiye neden olmakta ve bu nedenle sinyaller GPS uydularından iki farklı taşıyıcı frekans (L1 ve L2) üzerinden yayınlanmaktadır. Boşlukta kod ve faz, ışık hızında yayılırlar (Klobuchar ve Doherty 1990). Ancak, iyonosferdeki serbest elektronlar, taşıyıcı dalganın faz hızını artırır, kod hızını ise geciktirir. İyonosferik etki kod ve faz sinyalleri için aynı büyüklüğe ve ancak ters işaretlere sahiptirler. Sonuç olarak görelî veya diferansiyel GNSS yöntemi ile konum belirlemede alıcıların çok frekanslı olması özelliği nedeniyle özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda iyonosferik etki büyük oranda giderilmektedir. Ancak, tek frekanslı alıcılar için böyle bir çözüm olanaklı değildir. Özellikle L bandında navigasyon amaçlı kullanılan kod ölçülerine bu düzeltme getirilmezse örneğin GPS L1 bandında (1575.42 MHz) düşük yükseklik açılarında ve yüksek iyonlaşma zamanlarında 50 metreye varan uydu-alıcı uzaklığı hataları söz konusu olacaktır (Bidaine vd. 2006).

Bu çalışmada, tek frekanslı alıcılarda yapılan GNSS ölçülerindeki iyonosferik etkinin en aza indirilebilmesi için GPS ve Galileo uydu navigasyon mesajlarında katsayılar şeklinde yayınlanan Klobuchar ve NeQuick iyonosferik modelleri incelenerek, buna ilişkin iyonosferik etki hesabı yazılımı hazırlanmış olup, bu yazılımla elde edilmiş olan hesaplama sonuçları tartışılmaktadır.

GNSS İLE KONUM BELİRLEMEDE İYONOSFERİK ETKİ (IONOSPHERIC EFFECT ON GNSS POSITIONING)

Uydu ile alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca olan toplam elektron miktarı, TEC (Total Electron Content) olarak ifade edilmektedir. TEC, uydu ve alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca alınacak (düşey ya da eğik) bir kesitteki 1 m²'deki toplam elektron sayısı olarak da ifade edilebilir. Uygulamada ise bu büyüklük TECU ile ifade edilir ve 1 TECU=10¹⁶ elektron/m² olarak kabul edilir (L1 sinyali için 1 TECU = 0.16 metrelik gecikmeye karşılık gelmektedir). TEC, genel olarak, yerel zamanla yaklaşık 14:00 civarında maksimum günlük değere ulaşmaktadır. Buradan iyonosferin, elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkisinin geceye göre gündüz daha fazla olacağı sonucuna varılabilir. Gece yarısı ile sabah 05:00 saatleri arasında minimum değere ulaşmaktadır. Yeryüzü manyetik ekvatoru civarında gece süresince ortalama iyonosferik etki 10 nanosaniye (~3m), gündüz ise 50 nanosaniye (~15m) kadardır (Klobuchar ve Doherty 1990). Ancak, Türkiye'nin de yer aldığı orta enlem kuşaklarında gündüz süresince oluşan TEC miktarı ve dolayısıyla etkisi manyetik ekvatora göre daha azdır. Bunun dışında gözlenen uydunun yükseklik açısının da iyonosferik etkinin büyüklüğü üzerinde etkisi vardır (Hoffmann vd. 2008). GNSS alıcısının zenitindeki iyonosfer, sadece bu doğrultudaki uydu-alıcı sinyal yolu için önemlidir. Oysa, GNSS ölçüleri farklı yükseklik açıları ve azimutlarda yapılmaktadır. Bu da GNSS sinyallerinin iyonosferin farklı bölgelerinden eğik yol izleyerek geldiği anlamına gelmektedir. Sonuç olarak, iyonosfer tabakasındaki iyonlaşma ve serbest elektronlardan kaynaklanan bu hata uydu ve alıcı arasındaki olması gereken (gerçek) geometrik uzunluk ile ölçülen mesafe arasında fark meydana getirmektedir ve bu farkın hesaplanarak ölçülmüş olan uydu-alıcı uzaklığına düzeltme olarak getirilmesi gerekmektedir. Bu fark (iyonosferik etki), (1) eşitliği hesaplanabilmektedir (EC 2016, Klobuchar 1987, Di Giovanni vd. 1990).

$$\Delta\rho_{R(Li)}^s = \Delta_{iono} = \pm 40.3 \frac{STEC}{f^2(Li)} \quad (1)$$

Burada;

Δ_{iono} = ölçülen ve gerçek geometrik uzunluk arasındaki fark olup birimi metredir.

$STEC$ = uydu-alıcı arasında oluşturulan eğik kesitte 1 m²'deki toplam elektron sayısı (TEC)

$f^2(Li)$ = sinyal frekansı (L1 veya L2) olup, Hz biriminde ifade edilmektedir.

(1) eşitliğinden görüleceği gibi iyonosferik gecikme etkisi TEC ile doğru orantılı olup sinyal frekansı ile ters orantılıdır. Buradan da farklı frekanstaki sinyallerin maruz kalacağı iyonosferik etki büyüklüğünün de farklı olacağı sonucuna varılabilir (Kahveci, 1997). Bu nedenle, iyonosferik etkinin büyük oranda giderilmesindeki en etkin yöntem çok frekanslı GNSS alıcılarının kullanılması olmaktadır.

Çok frekanslı GNSS alıcıları ile iyonosferik etki büyük ölçüde giderilmesine karşın tek frekanslı alıcılar için bu olanaklı değildir. Çok frekanslı alıcıların tek frekanslı alıcılara göre daha pahalı olmasından dolayı birçok uygulamada tek frekanslı alıcılar kullanılmaktadır. Tek frekanslı alıcıların kullanılması durumunda ise iyonosferik etkinin giderilmesi için bazı iyonosferik modeller kullanılması gerekmektedir. Ayrıca, özellikle gerçek zamanlı uygulamalar için uydu navigasyon mesajında yayınlanan iyonosferik model (GPS için Klobuchar modeli) katsayıları ($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$) kullanılarak düzeltme getirilmektedir. Bunlardan α katsayıları düşey yöndeki gecikmenin genliğini, β katsayıları ise modelin periyodunu ifade eden kübik fonksiyon katsayılarıdır. Bir yıl 37 alt zaman dilimine ayrılmış olup, bu katsayılar her bir alt zaman dilimine önceden GPS Ana Kontrol İstasyonu tarafından yüklenmekte ve bu değerler 6 günde bir güncellenmektedir (IS-GPS-200K 2019). Bu katsayıların kullanılması ile özellikle orta enlemlerde iyonosferik etkinin yaklaşık %50'si giderebilmektedir (, Klobuchar ve Doherty 1990, Komjathy 1997, Ciećko ve Grunwald 2020).

Tek frekanslı GPS alıcılarında iyonosferik etkinin giderilmesi için kullanılan model 1986 yılında John A. Klobuchar tarafından geliştirilen Klobuchar iyonosferik modelidir (Klobuchar 1987). Klobuchar modeli deneysel bir modeldir. Klobuchar algoritmasında ölçü bölgesindeki iyonosfer 8 katsayı ile tanımlanmakta olup (Çizelge 1’de ION ALPHA ve ION BETA katsayıları), bu model iki boyutlu “ince tek tabaka” modeli ile gösterilmektedir (Şekil 1). Bu modelde, düşey yöndeki TEC (VTEC: Vertical TEC) değerlerinin belirli bir yükseklikteki (H=350-450 km) iki boyutlu bir kesit içerisinde olduğu, uydu sinyalinin iyonosfer tabakasını (single layer) deldiği noktadaki (IPP: Ionospheric Pierce Point) zenit açısına (z’) bağlı olarak hesaplanan eğik TEC (STEC: Slant TEC) ile VTEC arasındaki dönüşüm ise (2) eşitliğindeki indirgeme oranı ile hesaplanabilmektedir (Sacher 1999, Jin vd. 2012, Wolfgang vd. 2013, Prieto-Cerdeira vd. 2014,). Şekil 1’de, SIP, alt-iyonosfer noktasını ifade etmektedir.

$$\text{STEC} = M(E) \cdot \text{VTEC}$$

$$M(E) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R \cdot \cos E}{R+H}\right)^2}} \quad (2)$$

Bu eşitlikte;

E= sinyal yükseklik açısını (E=90-z)

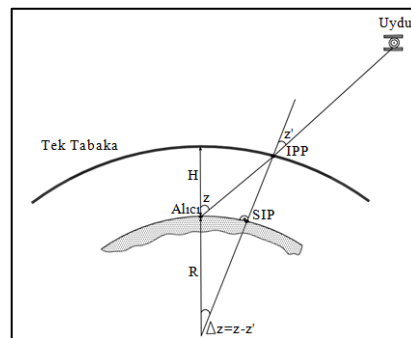
H= tek tabaka iyonosfer katmanı (F2) yüksekliğini (350-450km)

R=6371 km (yeryüzünün yarıçapı) ifade etmektedir.

Çizelge 1. GPS yayın (Broadcast) efemerisi mesajı içeriği

Table 1. Content of GPS Broadcast Ephemerides

2.10	N: GPS NAV DATA	RINEX
VERSION / TYPE		
teqc 2010Mar17		20110102 00:00:49UTC PGM /
RUN BY / DATE		
MSXP IAX86-PII bcc32 5.0 MSWin95->XP 486/DX+		COMMENT
GPSBase 2.61 3086		COMMENT
7.4506D-09 -1.4901D-08 -5.9605D-08 1.1921D-07		ION ALPHA
9.2160D+04 -1.1469D+05 -1.3107D+05 7.2090D+05		ION BETA
-3.725290298462D-09-1.332267629550D-14 61440 1617 DELTA-UTC:		
A0,A1,T,W		
		END OF HEADER



Şekil 1. Tek tabaka iyonosfer modeli

Figure 1. Single Layer Iono Model

Sonuç olarak, Klobuchar modelinde GPS L1 frekansındaki eğik kesit TEC (STEC) değerleri, sinyalin iyonosfer tabakasını deldiği noktadaki (IPP) düşey kesit TEC (VTEC) değerlerinden yararlanarak hesaplanmakta ve hesaplanan bu VTEC değeri, (2) eşitliğindeki indirgeme faktörü ile çarpılarak elde edilmektedir. Bu modelde, jeomanyetik enleme ve yerel zamana bağlı olarak iyonosferin günlük

değişimleri modellenmektedir. Bu nedenle, Klobuchar modelinde gündüz ve gece için ayrı hesaplamalar yapılmaktadır. Örneğin L1 frekansında yapılan gece ölçülerine tüm dünya için geçerli 5 nanosaniyelik (~1.5 m) sabit bir düzeltme öngörülmektedir. Dolayısıyla, yeryüzünde herhangi bir noktadaki etkiyi hesaplamak için GPS navigasyon mesajında yayınlanan 8 katsayı kullanılmaktadır. GPS Yer Kontrol Bölümünde, bu 8 katsayı mevsime ve güneş radyasyon hareketlerine bağlı olarak hesaplanmakta ve sürekli güncellenmektedir.

Galileo uyduları da kullanıcılarına, GPS uydularında olduğu gibi, çift (çok) frekanslı ve tek frekanslı hizmet sağlamaktadır. Galileo tek frekanslı alıcı için de iyonosferik etki algoritması kullanılmakta olup, bu algoritma "NeQuick Elektron Yoğunluk" modeline dayanmaktadır. Diğer bir ifadeyle, NeQuick modeli ile Galileo alıcısının bulunduğu coğrafi koordinatlara, zamana (UT) ve iyonosfer tabakası yüksekliğine bağlı olarak, uydu-alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca sayısal integral ile elektron yoğunluğu (TEC) hesabı yapılmaktadır. Bu model, güneş radyasyon aktivitesi değerlerine (sun spot number veya solar radio flux) bağlı olarak sonuç vermektedir (Bidaine vd. 2006, EC 2016,). NeQuick modelinin ilk versiyonu, TEC hesabında kullanılmak üzere Uluslararası Telekomünikasyon Birimi (ITU-R) tarafından önerilmiş olup, günümüzde ise aynı kurum tarafından NeQuick2 versiyonunun kullanılması önerilmektedir (ITU-R 2019). NeQuick modeli ilk olarak (Di Giovanni ve Radicella, 1990) tarafından yapılmış analitik elektron yoğunluğu hesabı "DGR (Di Giovanni Radicella)" modeline dayanılarak oluşturulmuştur. ITU-R tarafından önerilen NeQuick modeli Galileo uydu sistemini kullanan tek frekanslı alıcıların iyonosferik düzeltmeleri için adapte edilmiş olup, "NeQuick_G" olarak isimlendirilmiştir. Bu model, Galileo uydularına ait navigasyon mesajı içerisinde 3 katsayı (a_0 , a_1 , a_2) ile verilmektedir.

"NeQuick_G" modelinde güneş radyasyon hareketliliği Galileo sistemi kontrol ve işletim merkezi tarafından tüm dünya için günlük (24 saat) hesaplanan etkin iyonlaşma seviyesi (Az) ile tanımlanmaktadır. Böylece, model kullanılırken ölçü anı için en iyi iyonlaşma seviyesi tanımlanmış olmaktadır. (EC 2016)'da Az , (3) eşitlikleri ile verilmektedir:

$$Az = a_0 + a_1\mu + a_2\mu^2 \quad (3a)$$

$$\tan(\mu) = \frac{I}{\sqrt{\cos\phi}} \quad (3b)$$

$$\tan I = 2 \cdot \tan\phi_m \quad (3c)$$

Burada (a_0 , a_1 , a_2), Galileo navigasyon mesajı içerisinde yayınlanan üç iyonosferik katsayıyı ifade etmekte olup, μ ise gözlemcinin jeodezik enlemine ($\cos\phi$) karşılık gelen manyetik alan eğim açısı (I) ile hesaplanan çift kutuplu manyetik alandaki enlem değeridir (μ ifadesi MODIP enlemi olarak da isimlendirilmektedir). μ , derece biriminde ifade edilmekte olup, NeQuick_G modeli içerisinde her bir coğrafi koordinat için karşılık gelen değerleri tablo halinde mevcuttur (EC 2016). Manyetik alan eğim açısı (I: GNSS alıcısı konumunun yatay düzlemi ile manyetik alan doğrultusu arasındaki açı) ise (3c) eşitliği ile genel olarak hesaplanabilir. (3c) eşitliğinde, ϕ_m , yer manyetik alanının iki kutuplu olduğu yaklaşıma göre hesaplanmış jeomanyetik enlemi ifade etmektedir (Bidaine vd. 2006). Burada; a_0 , a_1 ve a_2 katsayıları günlük olarak güncellenmekte ve kullanıcılara sunulmaktadır (Çizelge 2).

NeQuick_G algoritması, Klobuchar modeline göre biraz daha karmaşık olup, tek frekanslı alıcılarda gerçek zamanlı kullanım için kurulması da bazı verilerin (CCIR: Comité Consultatif International des Radio communications) haritalarının ve enlem grid dosyasının önceden hazır olması gerekliliği nedeniyle, zahmetli olmaktadır. NeQuick_G modeli ile kod ölçülerindeki iyonosferik etkinin %70 oranında giderilebildiği birçok araştırmada yayınlanmıştır (Bidaine vd. 2006, Piriz vd. 2016).

Çizelge 2. Galileo navigasyon mesajındaki (a_0 , a_1 , a_2) katsayılarıTable 2. (a_0 , a_1 , a_2) coefficients in Galileo navigation message

```

-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
      3.03          N: GNSS NAV DATA      E: GALILEO NAV DATA RINEX VERSION / TYPE
NetR9 5.01          Receiver Operator      20150619 000000 UTC PGM / RUN BY / DATE
GAL      .1248D+03      .5039D+00      .2377D-01      .0000D+00      IONOSPHERIC CORR
GAUT      .3725290298D-08      .532907052D-14      345600 1849      TIME SYSTEM CORR
      16      17      1851      3      LEAP SECONDS
      END OF HEADER
E12 2015 06 19 02 10 00      -.138392508961D-02      -.131464616970D-09      .000000000000D+00
      .930000000000D+02      -.165531250000D+03      .285797618904D-08      .138275888459D+01
      -.782497227192D-05      .346679124050D-03      .114385038614D-04      .544062509727D+04
      .439800000000D+06      .298023223877D-07      -.296185101312D+01      -.111758708954D-07
      .965683294025D+00      .993750000000D+02      -.629360976005D+00      -.541593988135D-08
      -.571452374714D-11      .516000000000D+03      .184900000000D+04
      .312000000000D+01      .000000000000D+00      -.651925802231D-08      -.605359673500D-08
      .440734000000D+06

```

NeQuick_G yazılımının girdi parametreleri; gözlem noktasının üç boyutlu jeodezik koordinatları (enlem, boylam, yükseklik), gözlem tarihi (UT olarak gün, ay, yıl), güneş enerjisi hareketliliğinin seviyesini gösteren, 10.7 cm (F10.7) dalga boyundaki güneş radyasyon akısı (veya güneş lekesi sayısı) aylık ortalama değeridir (EC 2016). Bu başlangıç değerleri ve CCIR haritaları (CCIRxx.asc) kullanılarak diğer parametreler hesaplanmaktadır. Hesaplamalarda, kullanıcının tercihine bağlı olarak güneş radyasyon akısı yıllık ortalaması da (R_{12}) kullanılabilir.

PROGRAM ALGORİTMALARI (ALGORITHMS)

Klobuchar Algoritması (Klobuchar Algorithm)

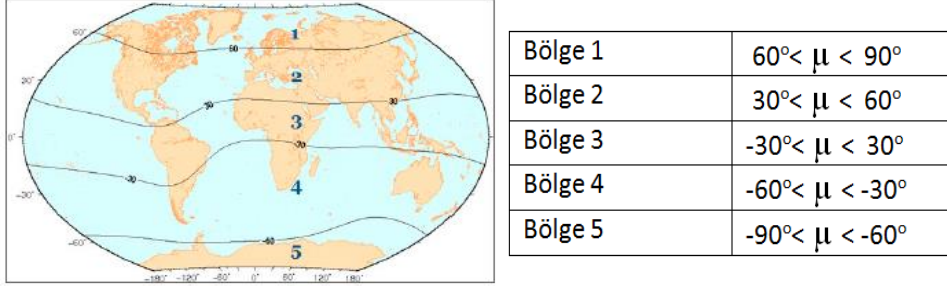
Tek frekanslı GPS alıcıları içerisinde kullanılmakta olan Klobuchar Algoritması; alıcı koordinatları, sinyal yükseklik açısı, gözlem yapılan uydunun azimutu ile α_n ve β_n katsayıları biliniyorsa (bu bilgiler GPS navigasyon mesajı içerisinde yayın efemerisi bilgileri olarak mevcuttur), (Klobuchar 1987)'de verilen hesaplama adımları takip edilerek çözülmektedir. Klobuchar modeli ile IPP (Ionosphere Pierce Point) noktasının jeomanyetik enlemine bağlı ve geceye ilişkin VTEC değeri olarak hesaplanmaktadır (Klobuchar 1987). Konya Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümünde yürütülen lisansüstü tez çalışması kapsamında Klobuchar algoritmasına dayalı Matlab tabanlı bir yazılım hazırlanmış ve makalenin sayısal uygulamasında kullanılmıştır.

NeQuick_G Algoritması (NeQuick_G Algorithm)

Daha önce de ifade edilmiş olduğu gibi NeQuick_G modeli, Galileo tek frekanslı uydu sinyallerinin gerçek zamanlı iyonosferik düzeltmelerini hesaplamak amacıyla NeQuick2 modelinden uyarlanmıştır. NeQuick modeli; zaman bağımlı üç boyutlu elektron yoğunluk hesaplama modeli olup, DGR profil modeline dayanmaktadır (Di Giovanni ve Radicella 1990). NeQuick_G modeli ile tek frekanslı Galileo alıcıları için uydu-alıcı uzaklığına getirilecek iyonosferik etki düzeltme modeli algoritması çok genel olarak aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır (OS SIS ICD 2006):

a. Etkin iyonlaşma seviyesi, A_z , navigasyon mesajı içerisinde yayınlanan üç iyonosferik katsayıdan (a_{i0} , a_{i1} , a_{i2}) (3) eşitliği ile hesaplanır (OS SIS ICD 2006, Aragon-Angel vd. 2006). A_z , 0 ile 400 arasında bir değer almaktadır (EC 2006). NeQuick modelinde, gözlem noktasının jeomanyetik enlemi, önceden hazırlanmış olan ($5^\circ \times 10^\circ$) grid dosyasından (Galileo için modip_9.asc) IGRF (International Geomagnetic Reference Field) modeli kullanılarak 3ncü dereceden Lagrange enterpolasyonu ile hesaplanmaktadır (URL2).

İyonosferik etkinin genel özelliklerine ve büyüklüğüne bağlı olarak yer manyetik alanına bağlı olarak Dünya için 5 μ (MODIP) bölgesi tanımlanmıştır (Şekil 2). Bu tanımlara göre Türkiye 2nci bölgede ($30^\circ < \mu < 60^\circ$) yer almaktadır.



Şekil 2. Farklı iyonosferik özelliklere sahip μ (MODIP) bölgeleri (EC 2016)

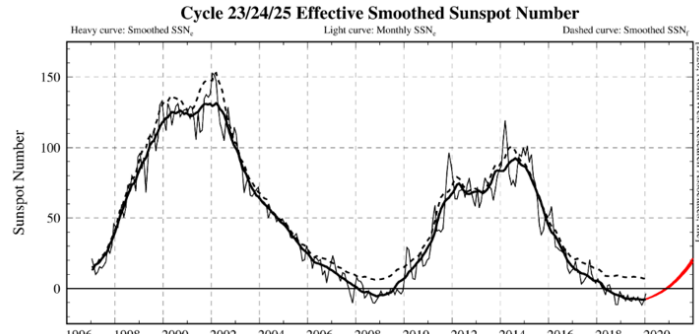
Figure 2. μ (MODIP) regions

- b. Az değeri bulunduktan sonra, STEC hesabı yapılır,
- c. Daha sonra (1) eşitliğiyle iyonosferik gecikme etkisi hesaplanır.

SAYISAL UYGULAMA VE TARTIŞMA (COMPUTATIONS AND DISCUSSION)

Tek frekanslı GNSS alıcılarında özellikle gerçek zamanlı konum belirlemede iyonosferik etki düzeltmeleri Klobuchar veya NeQuick modelleri ile yapılmaktadır. Günümüzde, yüksek doğruluk isteyen mühendislik amaçlı çalışmalarda genelde çift (çok) frekanslı alıcılar kullanıldığından, tek frekanslı alıcılarla konum belirleme genelde göz ardı edilmiştir. Oysa, tek frekanslı alıcılar dünya GNSS pazarında önemli bir orana sahiptir. Bunlara, birçok navigasyon cihazı, bazı askeri sistemlere entegre çalışan alıcılar vb. örnek olarak verilebilir. Konunun gelecekte daha da önem kazanacağı düşüncesiyle, GNSS ile tek frekanslı konum belirlemede en önemli hata kaynaklarından birisi olan iyonosferik etki hesabında en çok kullanılan iki hesap modeli karşılaştırılmıştır. Bu amaçla, literatürde hesap algoritmaları genel bilgi ve teorilerle verilen söz konusu iki model ile ilgili yazılımlar hazırlanmıştır. Galileo uydu sisteminde kullanılan NeQuick_G modeli global ölçekte kullanılmakta olup, bu çalışma kapsamında hazırlanan yazılımda gerekli tablolar bu global modeldeki haliyle kullanılmıştır.

Hesaplamalarda izlenen yöntemde; 2002 yılından bu yana yaklaşık 10 yıllık periyotlarla tekrar eden güneş radyasyon yayılımının en çok ve en az olduğu yıllarda seçilen yaz ve kış günlerine karşılık gelen ikişer gün için hesaplamalar yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda, güneş radyasyon yayılımının en çok ve en az olduğu yıllar sırasıyla 2002, 2009, 2014 ve 2019 olarak Şekil 3'de verilen haritadan belirlenmiş, yukarıda belirtilen her yıl 02 Ocak ve 02 Ağustos günleri için hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar her gün için öğle saat 12:00 UTC ve gece saat 03:00 UTC olarak ayrı ayrı yapılarak tablolanmış. Diğer taraftan, gerçekte 2020 yılı için hesaplamalar yapılması gerekirken, bu yıla ait bazı global değerlerin (örn. R12) 2020 yılı sonunda yayınlanacak olması nedeniyle 2019 yılı alınmıştır.



Şekil 3. Güneş radyasyon yayılımı grafiği (URL1)

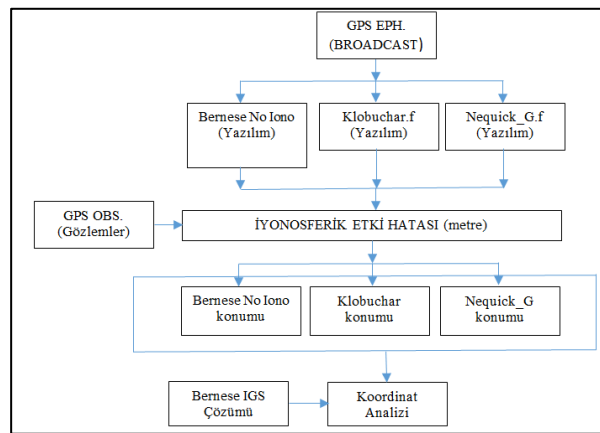
Figure 3. Smoothed Sunspot Number Graph

Sayısal uygulama, Ankara ve İstanbul TUSAGA-Aktif noktaları için yapılmış olup, hesaplamalarda kullanılan nokta konumları Çizelge 3’de verilmiştir. Çizelge 3’deki μ (MODIP) değerlerine bakıldığında, Türkiye’nin Şekil 2’deki 2nci bölgede yer aldığı görülmektedir. Bu çalışmada yapılan hesaplama yöntemi ve kullanılan modeller çok genel olarak Şekil 4’de verilmiştir. Şekil 4’de verilen iş akışı, uydularla konum belirleme (GNSS) yazılımı hazırlanması kapsamında devam eden başka çalışmalarını da içermekte olup, bu çalışmada, bu iş akışının “IGS Çözümü”, “GPS OBS” ve “Koordinat Analiz” bölümlerine ilişkin sonuçlar dahil edilmemiştir. Dahil edilmemiş olan bu sonuçlar başka bir yayının konusunu oluşturmaktadır.

Çizelge 3. Sayısal uygulamada kullanılan TUSAGA-Aktif noktaları

Table 3. CORS-TR stations used in computations

Nokta Adı	Enlemi (° ' ")	Boylamı (° ' ")	Elipsoit Yüksekliği (m)	μ (°) (02 Ocak 2020)	Datum/ Epok
Ankara (ANKR)	39 53 14.535182	32 45 30.491454	976.01790	48.802	ITRF96 (2005.0)
İstanbul (ISTN)	40 59 27.462292	28 49 53.882694	77.05219	49.694	ITRF96 (2005.0)



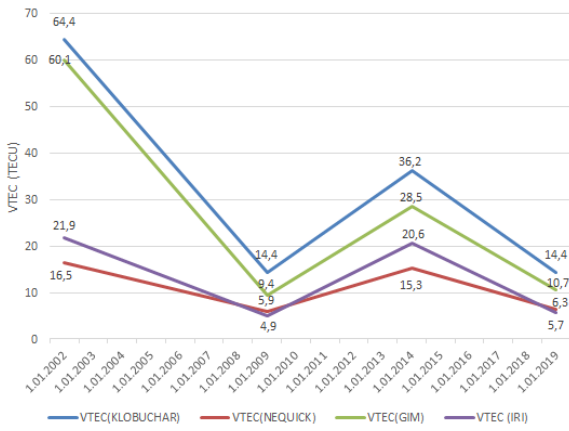
Şekil 4. Koordinat hesaplamaları genel iş akışı

Figure 4. General flowchart for coordinate computations

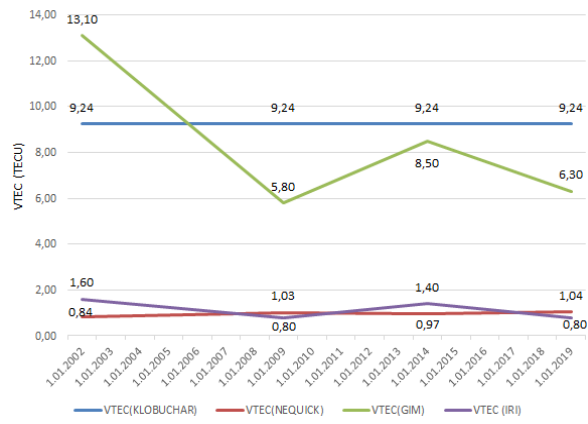
Hesaplamalar; Türkiye’nin en eski IGS noktası olan ANKR (Ankara) noktasında ve ISTN (İstanbul) noktalarının 2002, 2009, 2014 ve 2019 yılı 02 Ocak ve 02 Ağustos günlerindeki ölçüleri kullanılarak güneş

leke (sunspot) hareketlerinin en çok ve en az olduğu yaklaşık 11 yıllık devirlerde gündüz saat 12.00 (UTC) ve gece saat 03.00 (UTC) saatleri için VTEC değerleri ve bu değerlerin uydu-alıcı uzaklığındaki bozucu etkisinin büyüklüğü hesaplanmıştır. Ancak, ANKR ve ISTN noktalarına ait sonuçlar tamamen uyumlu çıktığı ve bu nedenle makale hacminin artmasını önlemek için burada sadece ANKR hesaplamalarına ait sonuçlar verilmiştir.

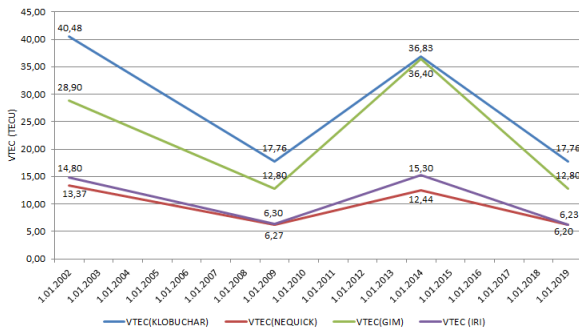
Şekil 3'de görülen güneş radyasyon dağılımının en az ve en çok olduğu yıllara ilişkin VTEC değişimi NeQuick ve Klobuchar modelleri için ayrı ayrı hesaplanmış olup, bu değerler, uluslararası standart olan ve gerek jeodezik gerekse iklim çalışmalarında kullanılan GIM (Global Ionosphere Model) ve IRI (International Reference Ionosphere) modellerinden elde edilen değerlerle de karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalara ilişkin grafikler Ocak ayları için Şekil 5 ve 6'da, Ağustos ayları için Şekil 7 ve Şekil 8'de görülmektedir.



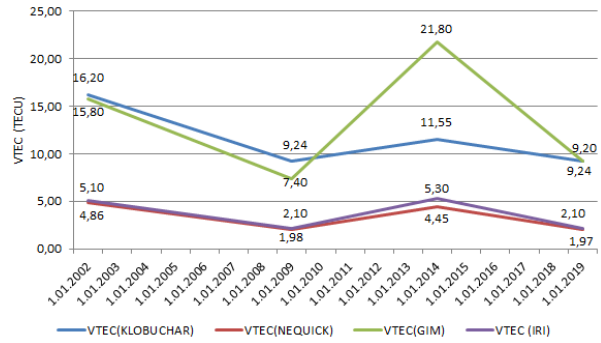
Şekil 5. ANKR VTEC değişimi (Ocak 12.00 UTC)
Figure 5. VTEC variation for ANKR (January 12.00 UTC)



Şekil 6. ANKR VTEC değişimi (Ocak 03.00 UTC)
Figure 6. VTEC variation for ANKR (January 03.00 UTC)



Şekil 7. ANKR VTEC değişimi (Ağu.12.00 UTC)
Figure 7. VTEC variation for ANKR (August 12.00 UTC)

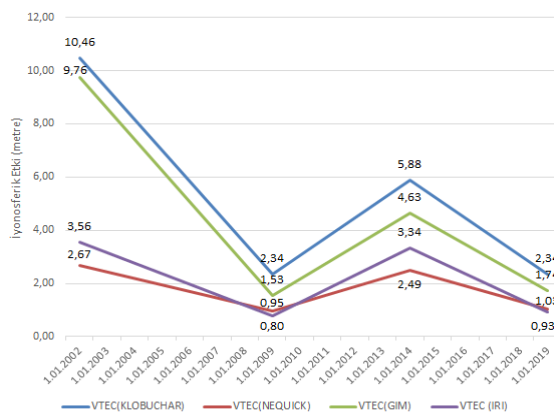


Şekil 8. ANKR VTEC değişimi (Ağu. 03.00 UTC)
Figure 8. VTEC variation for ANKR (August 03.00 UTC)

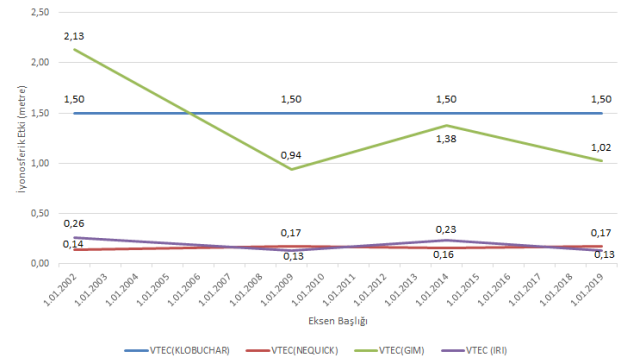
Yukarıdaki şekiller incelendiğinde, GNSS çalışmalarında teorik ve deneysel olarak bilinen iki önemli sonuç teyit edilmiş olmaktadır. Buna göre; VTEC değerleri, mevsimsel etki fark etmeksizin gece en az değere inmektedir. Diğer taraftan, Klobuchar modeli ile hesaplamalarda gündüzleri Ocak ayları için geceye göre yaklaşık 5-7 katı arasında değişmekte, Ağustos ayları için ise yaklaşık 2-3 katına kadar çıkmaktadır. NeQuick modeli ile hesaplamalarda ise gündüzleri Ocak ayları için geceye göre yaklaşık 5-15 katı arasında değişmekte, Ağustos ayları için ise yaklaşık 3 katına kadar çıkmaktadır. Burada dikkati çeken ikinci husus ise; Ağustos aylarında VTEC değerlerinde, gündüze göre daha az olsa da geceleri de değişim söz konusudur. Buradan, GNSS ile konum belirlemede, güneş radyasyon dağılımının en çok olduğu yıllarda ve yaz aylarında iyonosferik etkinin geceleri de önemli hata kaynaklarından birisi

olabileceği sonucuna varılabilir. Klobuchar modeli ile hesaplama sonuçlarını ifade eden Şekil 9 ve Şekil 10 incelendiğinde dikkati çeken bir başka konu ise, gece VTEC değerlerinin (ve dolayısıyla iyonosferik etki büyüklüğünün) aynı olmasıdır. Bu ise beklenen bir durumdur. Çünkü, Klobuchar algoritması incelendiğinde (Klobuchar 1987); iyonosferik gecikme fazının 1.57'den büyük ya da eşit olması durumunda gece saatleri için sabit bir değer alınmaktadır. Bu varsayımın NeQuick modeli sonuçları ile de uyumlu olduğu Şekil 9-12'de görülmektedir.

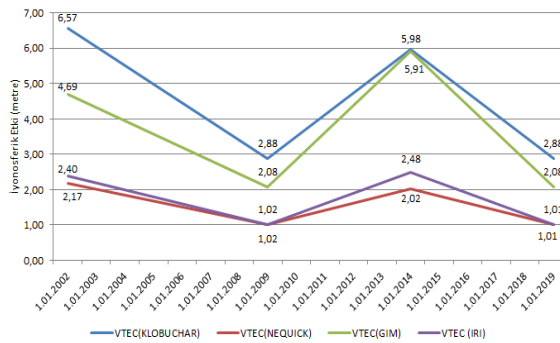
Güneş radyasyon dağılımının en az ve en çok olduğu yıllara ilişkin VTEC değerlerine bağlı olarak hesaplanmış ve GNSS uydu-alıcı uzaklıklarının hesabında bozucu etki olarak dikkate alınması gereken iyonosferik etki büyüklüğü değerleri NeQuick, Klobuchar, GIM ve IRI modelleri için ayrı ayrı hesaplanmış olup grafikleri Ocak ayları için Şekil 9 ve 10'da, Ağustos ayları için Şekil 11 ve 12'de verilmiştir.



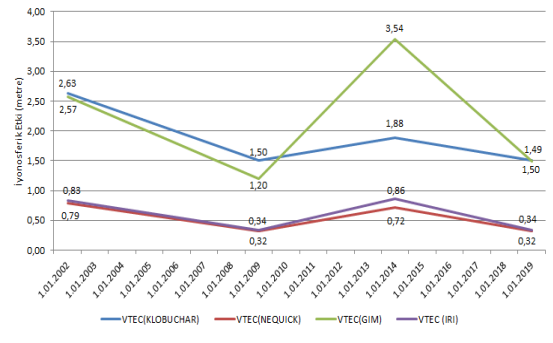
Şekil 9. ANKR İyono. Etki (Ocak 12.00 UTC)
Figure 9. IONO Effect for ANKR (January 12.00 UTC)



Şekil 10. ANKR İyono. Etki (Ocak 03.00 UTC)
Figure 10. IONO Effect for ANKR (January 03.00 UTC)



Şekil 11. ANKR İyono. etki (Ağu.12.00 UTC)
Figure 11. IONO Effect for ANKR (August 12.00 UTC)



Şekil 12. ANKR İyono. etki (Ağu. 03.00 UTC)
Figure 12. IONO Effect for ANKR (August 03.00 UTC)

İyonosferik etki büyüklüğü, VTEC değerlerine bağlı olarak hesaplandığından, VTEC grafikleri ile iyonosferik etki grafiklerinin aynı eğilimi göstermeleri beklenen bir durumdur. (Şekil 9 ve Şekil 10'da da görüldüğü gibi, iyonosferik etki büyüklüğü VTEC değerinin en az olduğu kış ayları için gece yaklaşık 20 cm, gündüz ise 1 metreyi; en çok olduğu kış ayları için ise gece yaklaşık 70 cm, gündüz ise 2 metreyi bulabilmektedir. GNSS uydu-alıcı uzaklığı hesaplarında dikkate alınmazsa, bu bozucu değerler koordinat hesaplarında hataya neden olacaktır.

Şekiller 5-12'deki grafiklerdeki sayısal değerlerden de görüleceği gibi, Klobuchar modeli ile NeQuick modeli hesaplama sonuçları arasında önemli farklılıklar görülmektedir. Bu farkların birçok nedeni bulunmaktadır. Örneğin; NeQuick modelinin Klobuchar modeline göre daha etkin ve ayrıntılı algoritmaya sahip olup, güneş radyasyon dağılımı gibi bazı global değerler (R12) deneysel olarak elde edilmektedir. Diğer taraftan, her iki model için kullanılan tek tabaka modeli tanımları farklıdır. Sonuç

olarak, bu her iki modelden elde edilen VTEC sonuçlarının doğrulukları hakkında kısmen de olsa bilgi sahibi olabilmek için Global İyonosferik Haritalardan (GIM) yararlanılabilir. Çok sayıda GIM haritaları farklı kurumlar tarafından yayınlanmakta olup, bunlardan en bilinen ve kullanılanları; IRI (URL3), IGS (URL4) ve CODE (URL5) ürünleridir. Günümüzde iyonosferik etki hesaplamalarında GIM ve IRI gibi global modeller daha fazla tercih edildiği için, bu çalışmada Klobuchar ve NeQuick modelleri ile elde edilmiş sonuçlar bu global model sonuçları ile karşılaştırılarak VTEC analizi hata hesabı (rms) yapılmıştır. Söz konusu hesaplama (4) eşitliği kullanılarak yapılmış olup, sonuç değerler Çizelge 4’de verilmiştir. Hesaplama tekniği bağlamında IRI ve NeQuick modelleri kendi arasında benzer (deneysel), GIM ile Klobuchar ise kendi arasında benzer (teorik) esaslara dayandığı için Çizelge 4’deki karşılaştırma bu özelliklerine dayanılarak yapılmıştır.

Çizelge 4. GIM ve IRI modelleri ile karşılaştırmalar (VTEC analizi)

Table 4. Comparison to GIM and IRI models

Ocak Ayları	IRI ve NeQuick	GIM ve Klobuchar
Rms (03 UTC)	0.5 TECU	0.8 TECU
Rms (12 UTC)	3.8 TECU	6.5 TECU
Ağustos Ayları	IRI ve NeQuick	GIM ve Klobuchar
Rms (03 UTC)	0.4 TECU	5.2 TECU
Rms (12 UTC)	1.6 TECU	6.8 TECU

$$rms = \sqrt{\frac{\sum(VTEC_M - VTEC_R)^2}{N}} \quad (4)$$

(4) eşitliğinde;

$VTEC_M$: NeQuick ve Klobuchar modelleri ile yapılan hesaplamaları,
 $VTEC_R$: GIM ve IRI VTEC değerlerini,
 N ise toplam hesaplama yapılan nokta sayısını ifade etmektedir.

Çizelge 4’deki “rms” değerleri incelendiğinde, bu değerlerin TECU hesabında kabul edilen genel sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir. Söz konusu sınır değerler bu makalenin sonunda isimleri verilen kaynakların büyük bölümündeki sayısal uygulama sonuçlarında ve yorumlarda yer almaktadır. Rovira-Garcia vd. (2020)’de yapılmış olan bir araştırmada, küresel ölçekte, NeQuick_G modelinin Klobuchar modeline göre yaklaşık %6’lık daha doğru sonu verdiği ifade edilmektedir. Ayrıca, Orus-Perez (2017)’de, 2014 yılında yaşanmış olan maksimum güneş hareketleri döneminde tek frekanslı GNSS alıcılarındaki performans araştırılmış olup, yine küresel ölçekte, NeQuick_G modeli ile elde edilmiş olan sonuçların GPS Klobuchar modeline yatay koordinatlarda %20, düşeyde ise %11’lik daha iyi rms değerleri verdiği doğrulanmıştır.

TEC birimindeki tablo değerlerinin öneminin daha somut olarak anlaşılmasını sağlamak için hesaplamalarda iyonosfer modeli kullanmak ile kullanılmamanın nokta konum doğruluklarına etkisi örnek olmak üzere sadece 2014 yılı 02 Ocak ve 02 Ağustos günlerine ait GPS ölçüleri Bernese yazılımı (Dach vd. 2015) ile hesaplanmış olup, sonuçlar Yer merkezli kartezyen koordinat farkları cinsinden Çizelge 5’de verilmiştir. Dolayısıyla, makalenin kapsamını; makale başlığı ile sınırlı tutmak ve sadece iyonosferik etkinin büyüklüğüne odaklanmak amacıyla burada yalnızca ANKR noktası için yapılan sonuçlara yer verilmiştir.

Çizelge 5. Bernese Yazılımı ile İyonosferik etki “hesaplanmış” ve “hesaplanmamış” koordinat farkları*Table 5. Iono computed and non-iono-computed coordinate differences using Bernese Software*

BERNESE HESAP MODELİ	$\Delta X \pm \sigma$ (m)	$\Delta Y \pm \sigma$ (m)		$\Delta Z \pm \sigma$ (m)
İyonosferik etki var-iyonosferik etki yok(02.01.2014)	-7.51±0.06	-4.97±0.05		-7.54±0.06
İyonosferik etki var-iyonosferik etki yok(02.08.2014)	-6.63 ±0.06	-4.18 ±0.05		-6.20±0.06

Çizelge 5’de verilen sonuçlar yorumlanırken Bernese yazılımı ile yapılmış olan hesap parametreleri dikkate alınmalıdır (Dach vd. 2015). Bu bağlamda hesaplamalarda, makaledeki çalışmanın amacına uygun olarak L1 kod ölçüleri ile Saastamoinen troposferik modeli ve IGS sonuç yörünge bilgileri kullanılmıştır (faz ölçüleri ve hesaplama teknikleri kullanılmamıştır). Dolayısıyla, olası tüm hata kaynakları modellenerek sadece ionosferik etki dikkate alınacak şekilde bir model oluşturulmuştur. Çizelge 5’de verilen sonuçlar teori ile uyumlu olup, buradan da görüleceği gibi, ionosferik etki GNSS ölçü ve hesaplamalarında önemli bir hata kaynağıdır ve ölçülere (özellikle gerçek zamanlı konum belirlemede) bu düzeltmeler mutlaka getirilmelidir. Bu ise, gelecekte Türkiye’de de üretilmesini hayal ettiğimiz yerli ve millî GNSS alıcı yazılımlarında dikkate alınması gereken önemli konudur.

SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmadan elde edilmiş olan sonuçlar incelendiğinde, Türkiye’de tek frekanslı GNSS alıcısı üretimi söz konusu olduğunda, alıcı yazılımları içerisinde, en önemli hata kaynaklarından olan ionosferik etki hesabı için Klobuchar veya NeQuick_G modellerinin gerçek zamanlı birçok pratik uygulama için yeterli sonucu sağlayacağı değerlendirilmektedir. Hangi modelin kullanılmasının daha iyi olacağı ise kullanılacak alıcının teknik özelliklerine bağlıdır. Örneğin, eğer üretilecek GNSS alıcısı üst düzey teknik özelliklere (bellek kapasitesi, hız vb.) sahip değilse Klobuchar modeli basit ve hızlı bir algoritmadır. Diğer taraftan, Klobuchar’a göre biraz daha iyi bir konum doğruluğu hedefleniyorsa ve bazı global modellerin kullanımı GNSS alıcısı kapasitesini ve hızını zorlamayacaksa NeQuick_G modeli daha uygun bir algoritmadır. Klobuchar modelinin NeQuick modeline göre çok daha kolay hesaplama olanağına sahip olduğu göz önüne alındığında, Rovira-Garcia vd. (2020)’de ifade edilmiş olan, %6’lık bir iyileştirmenin gerçek zamanlı uygulamalarda ne kadar yararlı olacağı kullanım amacına bağlı olarak farklılık gösterecektir. Sonuç olarak, üretilecek GNSS alıcısının hangi amaçlar için kullanılacağı ve dolayısıyla beklenen gerçek zamanlı doğruluk, hangi modelin kullanılacağını belirleyen en önemli konulardır. Diğer taraftan, GLONASS navigasyon mesajları ionosferik düzeltme parametrelerini içermemektedir. Bununla birlikte, bu çalışmada kullanılmış olan Klobuchar ve NeQuick_G modellerinin, GLONASS gözlemlerindeki ionosferik etki hesabı için de kullanılabileceği düşünülmektedir.

Günümüzde tüm dünyada kullanımda olan tek frekanslı GNSS alıcı sayısının toplam GNSS alıcısı sayısına oranının %75 olarak tahmin edildiği dikkate alınırsa, bu algoritmaların önemi daha da artmaktadır. Diğer taraftan, bundan daha da önemlisi, tek frekansta kod ölçüleri ile gerçek zamanlı konum belirlemede atmosferik etkilerin olabildiğince giderilmesi, elde edilecek gerçek zamanlı koordinatların doğruluğunu önemli ölçüde artıracaktır. Bunun sonucunda da gerçek zamanlı konum belirlemenin askerî ve sivil amaçlı kullanım alanları oldukça artacaktır. Sonuç olarak, tek frekanslı alıcılar için ionosferik modellere ilişkin karşılaştırmaların daha çok sayıda ve farklı coğrafi bölge ve zaman dilimleri için yapılması ve elde edilecek sonuçlara bağlı olarak belki de Türkiye için farklı bir bölgesel modelin geliştirilmesinin gerekebileceği açıktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aragon-Angel A., Orus, R., Hernandez-Pajares, M., Juan, J.M. ve Sanz J., 2006, "Preliminary NeQuick assessment for future single frequency users of Galileo", in *Proceedings of the 6th Geomatic Week*, Barcelona, Spain.
- Bidaine, B., Prieto-Cerdeira, R. ve Orus, R., 2006, "NeQuick: In-Depth Analysis and New Developments", In *Proceedings of the 3rd ESA Workshop on Satellite Navigation User Equipment Technologies NAVITEC*, Noordwijk, The Netherlands.
- Ciećko, A. ve Grunwald, G., 2020, "Klobuchar, NeQuick G, and EGNOS Ionospheric Models for GPS/EGNOS Single-Frequency Positioning under 6–12 September 2017 Space Weather Events", *Appl. Sci.*, 10, 1553; doi:10.3390/app10051553.
- Dach R., Lutz, S., Walser, P. ve Fridez, P., 2015, "Bernese GNSS Software Version 5.2", *Astronomical Institute*, University of Bern.
- Di Giovanni, G. ve Radicella, S.M., 1990, "An Analytical Model of the Electron Density Profile in the Ionosphere", *Adv. Space Res.*, 10 (11), 27-30.
- EC, 2016, "European GNSS (Galileo) open service ionospheric correction algorithm for Galileo single frequency users". European Commission.
- Hoffmann-W.B., Lichtenegger, H., Wasle, E., 2008, "GNSS-Global Navigation Satellite Systems", Springer-Verlag Wien, eISBN: 978-3-211-73017-1.
- IS-GPS-200K, 2019, *NAVSTAR GPS Space Segment/Navigation User Segment Interfaces*.
- ITU-R, 2019, "Ionospheric propagation data and prediction methods required for the design of satellite networks and systems", *Recommendation ITU-R P.531-14.P Series Radio wave propagation*.
- Jin, R., Jin, S. ve Feng, G., 2012, "M_DCB: MATLAB code for estimating GPS satellite and receiver differential code biases", *GPS Solution*, 16, 541–548.
- Kahveci, M., 1997, "Türkiye Koşullarında Yapılan GPS Gözlemlerinde Ortam Etkilerinin Araştırılması", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kahveci M., ve Yıldız F., 2018, "GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri", 10.basım, Nobel Yayıncılık, Ankara.
- Klobuchar J.A., 1987, "Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users". *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems* ;(3):325-331.
- Klobuchar, J.A. ve Doherty, P.H., 1990, "The Statistics of Ionospheric Time Delay for GPS Ranging on L1." *Proceedings of the ION GPS-90, the 3rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Colorado Springs, CO, 19-21 September*, The Institute of Navigation, Washington, DC, pp.161-168.
- Komjathy A., 1990, "Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System", *Technical report Nr.188*, Department of Geodesy and Geomatics Engineering University of New Brunswick.
- Naoki, A. ve Kazuaki, H., 1998, "Correction of ionospheric delay on GLONASS using the GPS navigation message", In *Proceedings of the ION GPS*, Long Beach, CA, USA; pp. 667–671.
- Orus-Perez R., 2017, "Ionospheric error contribution to GNSS single frequency navigation at the 2014 solar maximum", *J Geodesy* 91(4):397–407.
- OS SIS ICD-2006, "Galileo Open Service, Signal in Space Interface Control Document", *European Space Agency*.
- Paakki, T., DellaRosa, F. ve Nurmi, J., 2015, "PVT Computation Issues in Mixed Galileo/GPS Reception In: Nurmi, J. Lohan, E. S. Sand, S. Hurkskainen, H., eds. GALILEO Positioning Technology", Springer, New York.
- Piriz, R., Roldan, P., Golcz, R., Moriana, C. ve Leute, J., 2016, "Performance of the NeQuick G iono model for single-frequency GNSS timing applications", *European Frequency and Time Forum (EFTF)*, IEEE.

- Prieto-Cerdeira R., Orus-Peres, R., Breeuwer, E., Lucas-Rodriguez, R. and Falcone, M., 2014, "Performance of the Galileo Single-Frequency Ionospheric Correction During In-Orbit Validation", *GPS world*, 25(6), 53-58.
- Rovira-Garcia, A., Ibanez-Segura, D., Orus-Perez, R., Juan, J.M., Sanz, J. and Gonzalez-Casado, G., 2020, "Assessing the quality of ionospheric models through GNSS positioning error: methodology and results", *GPS Solutions*, 24:4.
- Schaer S, 1999," *Mapping and predicting the earth's ionosphere using global positioning system*", Doctoral dissertation, Astronomy Institute, University Bern, Switzerland.
- Wolfgang R.D. ve Thaller, D., 2013, "IERS Annual Report, International Earth Rotation and Reference Systems Service", *Central Bureau. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie*, 2014. 157 pp., ISBN 978-3-86482-073-1.
- URL1: <https://spawx.nwra.com/spawx/ssne-cycle.html> , ziyaret tarihi : 29 Ekim 2020.
- URL2: The 10th Generation International Geomagnetic Reference Field, [Online], <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>, ziyaret tarihi : 29 Ekim 2020.
- URL3: International Reference Ionosphere. <https://iri.gsfc.nasa.gov/>, ziyaret tarihi : 29 Ekim 2020.
- URL4: International GNSS Service. <http://www.igs.org/products>, ziyaret tarihi : 29 Ekim 2020.
- URL5: <http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/>, ziyaret tarihi : 29 Ekim 2020.