



GNSS ile Konum Belirlemede Farklı Troposferik Modellerin İncelenmesi

Investigation on Different Tropospheric Models in GNSS Positioning

Muzaffer Kahveci, ^{1*} Sümeyra Kırtıl ²

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

² Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

Sorumlu Yazar / Corresponding Author *: mkahveci@ktun.edu.tr

Geliş Tarihi / Received: 12.06.2021

Araştırma Makalesi/Research Article

Kabul Tarihi / Accepted: 07.12.2021

DOI: 10.21205/deufmd.2022247113

Atıf şekli/ How to cite: KAHVECİ M., S. KIRTIL (2022). GNSS ile Konum Belirlemede Farklı Troposferik Modellerin İncelenmesi. DEUFMD, 25(71), 475-486.

Öz

GNSS, bugüne kadar geliştirilmiş en yüksek doğruluklu konum belirleme ve navigasyon sistemi olmasına karşın, GNSS ölçülerinden elde edilen sonuçları da etkileyen bazı raslantısal ve sistematik sapmalar (bias) söz konusudur. Bu sapmaların bazıları göreceli konum belirleme yöntemlerinin kullanılması durumunda bile bozucu etkilerini sürdürmektedir. Bu sapmalar GNSS'nin birçok kullanım alanı için (ör. navigasyon amaçlı uygulamalar, askerî uygulamalar vb.) fazla önemli bir sakınca oluşturmamakla birlikte özellikle bilimsel amaçlı çalışmalarda (yüksek doğruluklu konum belirleme, yerkaşu hareketlerinin belirlenmesi, jeoit, datum belirleme vb.) bunların davranışı ve büyüklüğü çok iyi modellendirilmeli ve kontrol altında tutulmalıdır. Yukarıda ifade edilen bozucu etkileri (sapmaları) çok farklı şekillerde sınıflandırmak olanaklı olmakla birlikte çok genel olarak uydulara bağlı sapmalar, alıcı donanımına bağlı sapmalar ve ortam etkileri şeklinde sınıflandırılabilir.

Bu makalede, ortam etkileri sınıflamasına giren atmosferik etkilerden troposferik etki konusu incelenmiştir. Bu bağlamda, günümüzde statik GNSS ölçülerinin değerlendirilmesi yazılımlarında yaygın olarak kullanılmakta olan çok sayıda troposferik model incelenmiş, bu modellerin hesaplama seçeneği olarak sunulduğu Matlab tabanlı bir yazılım hazırlanarak, bu yazılımla yapılan sayısal uygulama sonuçları sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, yüksek doğruluk gerektiren bilimsel amaçlı çalışmalarda Niell ve VMF modellerinin en uygun sonuçları verdiği, yüksek doğruluk istemeyen (örn. askeri, navigasyon ve tek frekanslı GNSS alıcısı yazılım hazırlama amaçlı) uygulamalar içinse geleneksel Saastamoinen ve Hopfield modellerinin kullanılmasının yeterli olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: GNSS, troposferik etki, Saastamoinen, Hopfield, Niell, VMF

Abstract

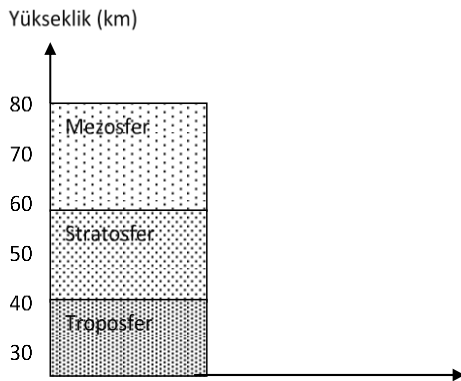
Although GNSS is the most accurate positioning and navigation system ever developed, there are some random and systematic biases that affect the results obtained from the GNSS observations. Some of these biases retain their disruptive effects even when using relative positioning methods. These deviations do not constitute a significant disadvantage for many uses of GNSS (e.g. navigation and military applications), but their behaviour and size must be well modelled and kept under control particularly in scientific studies (e.g. high accuracy location determination, earthquake prediction studies, geoid and datum determination etc.). Although it is possible to classify the aforementioned deviations in many different ways, they can be classified very generally as satellite&receiver dependent biases and environmental effects.

In this article, the tropospheric effect which is one of the environmental effects is examined. In this study, some tropospheric models, which are widely used in processing of static GNSS observations today, have been examined, and a Matlab-based software has been prepared and the numerical application results carried out with this software have been presented. According to the results obtained, Niell and VMF models give the most appropriate results in scientific studies requiring high accuracy. For acetveapplications that do not require high accuracy (eg. military, navigation and single-frequency GNSS receiver software), it has been determined that using traditional Saastamoinen and Hopfield models is sufficient.

Keywords: GNSS, tropospheric effect, Saastamoinen, Hopfield, Niell, VMF

1. Giriş

GNSS uydularından yayınlanan sinyaller atmosfere girmeden önce uzaydaki boşlukta ilerlerler. Bu sinyaller atmosfere girdiğinde içinden geçtikleri ilk tabaka iyonosferdir. GNSS sinyallerinin iyonosferdeki ilerleme hızı sinyal frekansına bağlıdır. Dolayısıyla, iyonosfer tabakasının GNSS sinyallerine olan etkileri çift frekanslı ölçülerle büyük oranda giderilebilmektedir. İyonosferden geçen sinyaller sırasıyla mezosfer, stratosfer ve troposfer tabakalarından ilerlerler (Şekil 1).



Şekil 1. GNSS sinyalinin içinden geçtiği atmosfer katmanları

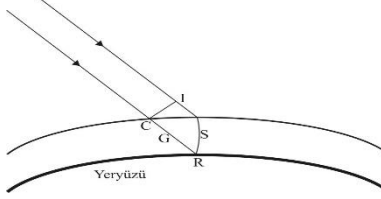
Troposfer, havanın yeryüzü ile temas hâlinde olan en alt tabakasıdır. Kalınlığı kutuplarda yaklaşık 8 km, ekvatorda yaklaşık 18 km'dir. Hava olayları genel olarak troposferin 3-4 km'lik alt kısımlarında görülmektedir. İyonosfer tabakasının aksine troposfer tabakası elektrik yüklü olmadığından yaklaşık 30 GHz'in altındaki radyo frekansları için dağıtıcı özelliğe sahip değildir. Bu nedenle, troposfer tabakasında GNSS sinyallerinin yayılması frekans bağımlı değildir. Dolayısıyla, troposferin faz ve kod ölçülerine olan etkisi aynı büyüklüktedir ve GNSS alıcılarının çift frekans özelliğinden yararlanarak gidermek olanaklı değildir [19].

Nötr (iyonize olmamış) atmosferin radyo frekanslarında yayınlanan elektromanyetik dalgalara olan etkisi troposferik gecikme etkisi (ya da troposferik refraksiyon) olarak isimlendirilmektedir. Nötr atmosfer elektromanyetik dalgaların hızını ve yönünü değiştirir. Bu etki elektromanyetik dalga'nın yavaşlamasına ve eğilmesine neden olur. Başka bir ifadeyle, normal olarak GNSS ölçüleri sonucu elde edilmesi gereken uzunluk atmosfer dışında kalan sinyal yolu ile Şekil-2'de görülen "G" geometrik uzaklığının toplamıdır. Ancak, gerçekte durum böyle değildir. Elektromanyetik dalgalar iki nokta arasındaki en kısa yolu

izledikleri için ölçülen uzunluk minimum sinyal yolu (Fermat yasası) olarak bilinen S uzunluğudur. Her iki etkinin neden olduğu gecikme uydusu ile alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca ortam kırılma indisinin (n) değişimine bağlıdır. Bu gecikme miktarı ise "S" sinyal yolu boyunca Şekil-2'den,

$$\Delta S_{trop} = \int_a^b (n - 1) dS + (S - G) \quad (1)$$

yazılabilir.



Şekil 2. Atmosferik kırılma

Elektromanyetik dalganın eğilmesinden dolayı gelecek etkiyi ifade eden (S-G) terimi çok küçük olduğundan göz ardı edilirse problem, (1) eşitliğindeki integralin alınması hâline dönüşür. Böylece troposferik gecikme etkisi,

$$\Delta S_{trop} = \int_a^b (n - 1) dS \quad (2)$$

olarak yazılabilir. Burada, kırılma indisi (n) yerine kırıcılık (N) kullanılırsa (2) eşitliği,

$$\Delta S_{trop} = 10^{-5} \int_a^b N(s) dS \quad (3)$$

$$N = (n - 1) \times 10^{-6}$$

hâlini alır. (3) eşitliğindeki atmosferik kırılma N (s); ısı, basınç ve su buharının bir fonksiyonu olarak,

$$N(s) = k_1 \cdot \frac{P_d}{T} + k_2 \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \quad (4)$$

ile ifade edilebilir. Burada P_d , kuru havanın toplam atmosferik basıncını (mbar), e , su buharı kısmi basıncını (mbar) ve T , Kelvin biriminde atmosferik sıcaklığı göstermektedir. k_1 , k_2 , k_3 katsayıları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. k_1 , k_2 , ve k_3 için deneysel olarak belirlenmiş değerler

k_1 (K/mbar)	$77,604 \pm 0,014$
k_2 (K/mbar)	$64,790 \pm 0,080$
k_3 (K ² /mbar)	$(3,776 \pm 0,004) \cdot 10^5$

Atmosfer, iki ideal gazın karışımı (kuru hava ve su buharı) olarak düşünülürse Eş. (4),

$$N = N_d(s) + N_w(s) \quad (5a)$$

$$N_d(s) = 77,6 \left(\frac{P}{T} \right) \quad (5b)$$

$$N_w(s) = 3,73 \times 10^5 \left(\frac{e}{T^2} \right) \quad (5c)$$

olarak iki ana bileşenle ifade edilebilir. Bunlardan $N_d(s)$ kuru bileşen, $N_w(s)$ ise ıslak bileşen olarak adlandırılmaktadır. Troposferik gecikmenin yaklaşık %90'ı kuru bileşen ve geri kalan %10'luk kısmı ise ıslak bileşenden oluşmakta olup, bu durum konuma ve zamana göre değişmektedir [1, 2, 15]. $N_d(s)$ 'nin troposferdeki değişimi çok küçük olup, 40 km ve daha yukarı yüksekliklerde gözardı edilebilir. $N_w(s)$ ise yalnızca yere yakın yükseklikler (0-5 km) için önemlidir. Troposferik gecikme, GNSS sinyalinin troposfer katmanındaki kat ettiği yola bağlı olduğundan aynı zamanda uyduya olan zenit açısının da bir fonksiyonu olacaktır. Bu nedenle GNSS ile gözlemlerde ve değerlendirmelerde uydusu sinyali yükseklik açısı 10 derece ve yukarısı seçilmektedir. Daha küçük açıların kullanılması sinyal yansıma etkilerine de neden olmaktadır.

Zenit doğrultusundaki gecikme miktarından yararlanarak herhangi bir zenit açısı doğrultusundaki değerin hesaplanmasını sağlayan $1/\cos Z$ fonksiyonuna indirgeme fonksiyonu (mapping function) adı verilmektedir. $1/\cos Z$ deneysel bir fonksiyon olup farklı araştırmacılar tarafından çok sayıda değişik indirgeme fonksiyonları yayımlanmıştır. ΔS_d^Z , zenit doğrultusundaki kuru bileşeni, ΔS_w^Z , zenit doğrultusundaki ıslak bileşeni ve f_d ile f_w bu bileşenler için indirgeme fonksiyonlarını göstermek üzere troposferik gecikme etkisi,

$$\Delta S_{trop}^Z = f_d \cdot \Delta S_d^Z + f_w \cdot \Delta S_w^Z \quad (6)$$

ile ifade edilebilir. f_d ve f_w için örnek olarak ($E = 90^\circ - Z$),

$$f_w = \frac{1}{\sin E + \frac{0,00035}{0,0170 + \tan E}} \quad (7a)$$

$$f_d = \frac{1}{\sin E + \frac{0,00143}{0,04454 + \tan E}} \quad (7b)$$

yazılabilir.

Troposferik gecikme hesabında kullanılan atmosferik parametreler standart troposferik modellerden, gözlem noktasında ölçülen meteorolojik verilerden (basınç, kuru ısı ve ıslak ısı) veya su buharı radyometrelerinden ve radyo sondajlardan yararlanarak elde edilmektedir. GNSS gözlemi yapılan noktalarda atmosferik parametrelerin ölçümü; kullanılan aletlerin kalibrasyon hataları, yapılan atmosferik ölçülerin noktanın üstündeki sinyal yolunu iyi temsil edememesi gibi nedenlerle, elde edilen GNSS sonuçlarında önemli hatalara neden olmaktadır. Bu durum özellikle kısa kenarlı (5-20 km) ağlarda daha da önem kazanmaktadır. Bu sakıncalardan kaçınmak için standart atmosfer modelinden yararlanarak hesaplanan atmosferik verilerin kullanılması günümüzde GNSS gözlemlerinin değerlendirilmesinde oldukça yaygındır.

Diğer taraftan, bilimsel amaçlı ve çok yüksek doğruluk isteyen hesaplamalarda bazı gelişmiş ticari yazılımlarda daha geliştirilmiş fonksiyonlar kullanılmaktadır. Bunlardan en bilinenleri ve özellikle düşük yükseklik açılarda (< 5 derece) toplanan verilerin hesabında kullanılan indirgeme fonksiyonları; Niell (Isobaric Mapping Function), VMF (Vienna Mapping Function) ve GMF (Global Mapping Function) olarak sayılabilir [3, 16, 18].

Bu makale çalışması, Konya Teknik Üniversitesinde "GNSS ile Mutlak Konum Belirleme" yazılımı hazırlanması kapsamında bu yazılımın farklı bileşenlerinin oluşturulduğu üç yüksek lisans tez çalışmasından birisi olan troposferik etki modellerinin uygulanmasına ilişkin bir çalışmadır. Troposferik etki hesabına ilişkin tez çalışmasında, daha sonra yayımlanması planlanan başka sonuç ve uygulamalar da bulunmakla birlikte bu makalenin amacı; GNSS ölçülerinin değerlendirilmesinde farklı troposferik modellerin karşılaştırılması ve bu karşılaştırma ile elde edilen sonuçların sunulması ile sınırlanmıştır. Bu bağlamda, günümüzde

statik GNSS ölçülerinin değerlendirilmesi yazılımlarında yaygın olarak kullanılmakta olan çok sayıda troposferik model incelenmiş, bu modellerin hesaplama seçeneği olarak sunulduğu Matlab tabanlı bir yazılım hazırlanarak, bu yazılımla yapılan sayısal uygulama sonuçları sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre, 5 derece ve daha büyük sinyal yükseklik açılarında yüksek doğruluk gerektiren bilimsel amaçlı çalışmalarda Niell ve VMF modellerinin en uygun sonuçları verdiği, yüksek doğruluk istemeyen (örn. askeri, navigasyon ve tek frekanslı GNSS alıcısı yazılım hazırlama amaçlı) uygulamalar içinse geleneksel Saastamoinen ve Hopfield modellerinin kullanılmasının yeterli olduğu ortaya konmuştur. Makalenin ikinci bölümünde GNSS hesaplamalarında kullanılmakta olan troposferik etki hesabı modelleri kısaca tanımlanmış, üçüncü bölümde sayısal uygulama ve tartışma, dördüncü bölümde ise sonuçlar ifade edilmiştir.

2. GNSS Hesaplamalarında Kullanılmakta Olan Troposferik Etki Modelleri

2.1. Geliştirilmiş Saastamoinen Modeli

Saastamoinen standart atmosfer modelinde (eğer arazide ölçülmüş gerçek meteorolojik değerler yoksa) genellikle, deniz düzeyindeki referans sıcaklık (T_0), basınç (P_0) ve nem (H_0) değerleri tanımlanmakta ve bu değerlerin yükseklikle doğrusal değiştiği kabul edilerek, GNSS gözlemi yapılan nokta yüksekliğindeki parametreler hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu değerler zamandan ve gerçek koşullardan bağımsızdır. Söz konusu referans değerleri için,

$$h_0 = 0 \text{ m}$$

$$T_0 = 18^\circ\text{C}$$

$$P_0 = 1013,25 \text{ mbar}$$

$$H_0 = \%50$$

kabul edilmektedir. Böylece h_u yüksekliğindeki bir nokta için değerler,

$$T_u = T_0 - 0,0065 \cdot h_u \quad (8a)$$

$$P_u = P_0(1 - 0,0000226 \cdot h_u)^{5,225} \quad (8b)$$

$$H_u = H_0 \cdot \exp(-0,0006396 \cdot h_u) \quad (8c)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

Sonuç olarak, Saastamoinen (1972a ve b)'de verilen geleneksel modelin güncellenmiş versiyonu "B" yükseklik düzeltme terimi ile tablo değeri "δL" terimi de eklenerek oluşturulmuş ve troposferik etki hesabı bu şekilde geliştirilmiş aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır [13].

$$\Delta S_{trop}^Z = \frac{0,002277}{\cos Z} \cdot \left[P + \left(\frac{1255}{273,15+T} + 0,05 \right) \cdot e - B \cdot \tan^2 Z \right] + \delta L \quad (9a)$$

Burada,

ΔS_{trop}^Z : metre biriminde uydu-alıcı uzaklığına getirilecek olan düzeltmeyi,

Z : uydu zenit uzaklığını,

P : atmosferik basınç (mbar),

T : mutlak sıcaklık (°C),

e : su buharı basıncını (mbar),

B : noktanın yüksekliğinden dolayı tablodan alınacak düzeltme katsayısı,

δL : uydu zenit açısına ve nokta yüksekliğine bağlı olarak tablodan alınacak olan düzeltme değeri (metre) olup,

$$TD = 273,16 + T$$

yazılırsa,

$$e = \frac{H}{100} \exp(-37,2465 + 0,213166 \cdot TD - 0,000256908 \cdot TD^2) \quad (9b)$$

elde edilir. (9b) eşitliğindeki H, nisbi nemi ifade etmektedir. Saastamoinen modelinin ilk halinde (9a) eşitliğindeki B düzeltme terimi sabit bir sayı olup, δL=0 dır [4, 5].

Saastamoinen formülü ölçü noktasının yaklaşık enlemine (φ) ve elipsoit yüksekliğine (h; km) bağlı olarak çok daha basit bir eşitlik şeklinde,

$$\Delta S_{trop}^Z = \frac{\Delta S_d^Z + \Delta S_w^Z}{\cos Z} \quad (10a)$$

$$\Delta S_d^Z = \frac{0,002277 \cdot P}{1 - 0,00266 \cdot \cos 2\varphi - 0,00028 \cdot h} \quad (10b)$$

$$\Delta S_w^Z = \frac{0,00277 \cdot e \cdot \left(\frac{1255}{TD} + 0,05 \right)}{1 - 0,00266 \cdot \cos 2\varphi - 0,00028 \cdot h} \quad (10c)$$

verilmektedir [4, 5].

2.2. Değiştirilmiş Hopfield Modeli

Hopfield modeli, hidrostatik denge durumuna dayanan radyosonde meteorolojik verileri kullanılarak oluşturulan ikinci dereceden bir form modelidir [7]. Bu model, sabit yerçekimi ivmesi kabulü ile kuru (hidrostatik) ve ıslak kırılma değerlerini yüksekliğin dördüncü dereceden bir fonksiyonu olarak modellemektedir. Geliştirilmiş Hopfield modeli aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmektedir [6, 7].

$$\Delta S_{trop}^Z (\text{metre}) = \Delta S_{dry}^Z + \Delta S_{wet}^Z \quad (11)$$

$$\Delta S_{trop}^Z = 10^{-6} \cdot N_i \sum_{k=1}^9 \frac{f_{k,i}}{k} \cdot r_i^k \quad (12a)$$

(12) eşitliğinde "i" indisi sırasıyla kuru(dry) ve ıslak (wet) bileşenleri ifade etmektedir. Ayrıca, "f" ve "r" ifadeleri ise aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$r_i = \sqrt{(R_E + h_i)^2 - R_E^2 \cdot \sin^2 Z} - R_E \cdot \cos Z \quad (12b)$$

$$f_{1,i} = 1$$

$$f_{2,i} = 4 \cdot a_i$$

$$f_{3,i} = 6a_i^2 + 4b_i$$

$$f_{4,i} = 4a_i(a_i^2 + 3b_i)$$

$$f_{5,i} = a_i^4 + 12a_i^2 \cdot b_i + 6b_i^2 \quad (12c)$$

$$f_{6,i} = 4a_i \cdot b_i(a_i^2 + 3b_i)$$

$$f_{7,i} = b_i^2(6a_i^2 + 4b_i)$$

$$f_{8,i} = 4a_i \cdot b_i^3$$

$$f_{9,i} = b_i^4$$

(12c) eşitliklerindeki katsayılar aşağıdaki gibidir:

$$a_i = -\frac{\cos Z}{h_i}$$

$$b_i = -\frac{\sin^2 Z}{2h_i \cdot R_E}$$

$$h_{dry}(metre) = 40136 + 148,72(T - 273,16)$$

$$h_w = 11000 \text{ m}$$

$$N_{dry} = \frac{77,64 \cdot P}{T} \left(\frac{K}{mb} \right)$$

$$N_{wet} = -\frac{12,96 \cdot e}{T} + \frac{371800 \cdot e}{T^2}$$

$$R_E = 6378137 \text{ m}$$

Yukarıdaki eşitliklerde; "z", uydunun zenit açısını, "T", GNSS noktasındaki yüzey sıcaklığını (Kelvin), "P", atmosferik basınç (mbar) ve "e" ise kısmi su buharı basıncını (mbar) ifade etmektedir. R_E , Yer yarıçapını ifade etmektedir.

Geliştirilmiş Hopfield modeli; yüzeyde ölçülmüş gerçek meteorolojik parametreler kullanılarak ve standart atmosferik modelden üretilen parametrelerin her ikisi de kullanılarak uygulanabilmektedir.

2.3. Niell Modeli (NMF)

NMF (Niell Mapping Function) modeli hesaplama kolaylığı ve yüksek doğruluğu nedenleriyle en çok tercih edilen modellerden birisidir ve Marini (1972)'de verilen modelin üç katsayılı halini esas almaktadır. Hesaplamalarda yüzeye ait atmosferik parametreleri kullanmaz. NMF, troposferik gecikmenin global iklim modeline dayanmakta ve dolayısıyla girdi olarak sadece zaman ve GNSS alıcısı koordinat bilgilerine ihtiyaç duymaktadır ve yaklaşık değer olarak hidrostatik zenit gecikme değeri kullanılmaktadır [15]. Niell modelinde kuru ve ıslak bileşenler için ayrı ayrı olmak üzere iki farklı eğiklik faktörü kullanılmaktadır. Niell modeli 3 derece ve üzerindeki sinyal yükseklik açıları için doğru sonuçlar veren bir model

olarak tercih edilen bir model olup, hidrostatik (kuru) ve ıslak bileşenler için eşitlikler aşağıda verilmektedir [8].

$$M_{dry}(E, H) = m(E, a_d, b_d, c_d) + \Delta m(E, H) \quad (13)$$

$$\Delta m(E, H) = \left[\frac{1}{\sin E} - m(E, a_{ht}, b_{ht}, c_{ht}) \right] \cdot H \quad (14)$$

$$M_{wet}(E) = m(E, a_w, b_w, c_w) \quad (15)$$

Bu eşitliklerde E, sinyal yükseklik açısını ve H ise kilometre biriminde GNSS alıcı antenin yüksekliğini ifade etmektedir. $m(E, a, b, c)$ ise (Marini 1972)'de verilen zenit doğrultusundaki değerlerdir. Diğer taraftan (a_d, b_d, c_d) katsayıları zaman ve enlem bağımlı parametreler olup aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır:

$$\xi(\varphi, t) = \xi_{avg}(\varphi) - \xi_{amp}(\varphi) \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t - T_0}{365.25}\right) \quad (16)$$

(16) eşitliğindeki "t", 0.0 Ocak'tan itibaren geçen zamanı ve "T₀" ise yılın gününü (DOY: Day Of Year) ifade etmektedir. "ξ_{avg}" ve "ξ_{amp}" değerleri ise Tablo 2'de verilen değerlerden en yakın iki enlem değeri arasında enterpole yapılarak hesaplanmaktadır. (a_{ht}, b_{ht}, c_{ht})

katsayıları doğrudan Tablo 2'den alınır, (a_w, b_w, c_w) katsayıları ise yine enlem bağımlı parametreler olup, Tablo 3'den en yakın iki "ξ(φ_i)" değeri arasından enterpole ile hesaplanır.

Tablo 2 ve 3'de verilen NMF katsayıları, çoğunluğu kuzey yarım kürede yer alan 26 radyosonda istasyonunda elde edilen bir yıllık meteorolojik verilerden yararlanarak her yıl Ocak ve Temmuz aylarında 15°, 30°, 45°, 60° ve 75° enlemleri için hesaplanmaktadır.

Tablo 2. Hidrostatik (kuru) bileşen katsayıları [18]

Katsayı	Enlem (φ)				
	15°	30°	45°	60°	75°
Ortalama					
<i>A</i>	1,2769934e-3	1,2683230e-3	1,2465397e-3	1,2196046e-3	1,2045996e-3
<i>B</i>	2,9153695e-3	2,9152299e-3	2,9288445e-3	2,9022565e-3	2,9024912e-3
<i>C</i>	62,610505e-3	62,837393e-3	63,721774e-3	63,824265e-3	64,258455e-3
Genlik					
<i>A</i>	0,0	1,2709626e-5	2,6523662e-5	3,4000452e-5	4,1202191e-5
<i>B</i>	0,0	2,1414979e-5	3,0160779e-5	7,2562722e-5	11,723375e-5
<i>C</i>	0,0	9,0128400e-5	4,3497037e-5	84,795348e-5	170,37206e-5
Yükseklik Düzeltmesi					
<i>a_{ht}</i>	2,53e-5				
<i>b_{ht}</i>	5,49e-3				
<i>c_{ht}</i>	1,14e-3				

Tablo 3. Islak bileşen katsayıları [18]

Katsayı	Enlem (φ)				
	15°	30°	45°	60°	75°
ξ					
<i>a_w</i>	5,8021897e-4	5,6794847e-4	5,8118019e-4	5,9727542e-4	6,1641693e-4
<i>b_w</i>	1,4275268e-3	1,5138625e-3	1,4572752e-3	1,5007428e-3	1,7599082e-3
<i>c_w</i>	4,3472961e-2	4,6729510e-2	4,3908931e-2	4,4626982e-2	5,4736038e-2

2.4. VMF Modeli (VMF)

VMF (Vienna Mapping Function) modeli genel olarak NMF ile aynı formata sahip olup, en önemli farkı katsayılar sayısal hava tahmin (NMW: Numerical Weather Model) modeline dayanmaktadır. VMF modelinin iki versiyonu mevcut olup bunlar nokta koordinatı ve epok tabanlı (yüksek doğruluklu) ve grid (hızlı) çözümler olarak tanımlanmaktadır [17]. Bunlardan hassas versiyonda kuru ve ıslak bileşenlerdeki tüm katsayılar sinyal yolu boyunca farklı uydu yükseklik açıları için EKK (En Küçük Kareler) yöntemi ile hesaplanmakta olup oldukça zaman alıcı bir yöntemdir. Diğer taraftan, pratik uygulamalar için VMF grid (hızlı) versiyonu kullanılmakta olup, burada sadece 3.3° uydu yükseklik açısında sinyal yolu boyunca olan ve (17)'deki eşitlikte yer alan katsayılar (*a_h*, *b_h* ve *c_h*) hesaplanmakta ve tüm diğer katsayılar diğer indirgeme modellerinden deneysel olarak elde edilmektedir. Hızlı versiyon, hassas versiyona göre 10 kat daha

hızlı bir yöntem olup, her 6 saatte bir 2.0°x2.5° boylam gridleri şeklinde yayınlanmaktadır. Yayınlarında, VMF modeli ile jeodezik ve jeofizik amaçlı en yüksek doğrulukların elde edilebildiği ifade edilmektedir [3, 9, 17]. Hızlı versiyonda ıslak ve kuru (hidrostatik) bileşenler için indirgeme fonksiyonu değerleri (17) eşitliği ile hesaplanmaktadır [10]:

$$mf(e) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{1 + \frac{1}{1+c}} \frac{1}{\sin e + \frac{b}{\sin e + c}} \quad (17)$$

Marini (1972)'de verilen (17) eşitliği kuru (hidrostatik) ve ıslak bileşen hesabında NMF ve VMF modellerinde temel eşitlik olarak kullanılmaktadır. (17) eşitliğinin bu modeller tarafından uygulamada kullanılmasındaki temel fark hesap girdi parametreleri ve a, b ve c katsayılarının belirlenmesi yöntemindedir. Bu farklılıklar Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. NMF ve VMF modelleri arasındaki farklar

Hesaplanan Büyüklük	NMF Girdi Parametreleri	VMF Girdi Parametreleri
Kuru (Hidrostatik) Bileşen	DOY (yılın günü) Elipsoit yüksekliği Jeodezik enlem	Elipsoit yüksekliği a, b ve c katsayıları
Islak Bileşen	Jeodezik enlem	a, b ve c katsayıları
(a, b, c) katsayıları belirleme yöntemi	Tablo 2 ve 3'den enterpole ile hesaplanır	Hesap yılı ve yılın günü için https://vmf.geo.tuwien.ac.at/trop_products bağlantı adresinden elde edilir.

2.5. GMF Modeli (GMF)

GMF (Global Mapping Function) modeli, bu makalenin konusu olmamakla birlikte, son yıllarda özellikle GNSS hesaplamalarında yoğun olarak kullanıldığı için kısa bir açıklama yapılmıştır. GMF modeli, harici veri kaynağına dayanan ve VMF modelinin bir yedeği şeklinde düşünülebilir [11]. Herhangi bir nedenle VMF değerlerine ulaşamadığı durumlarda GMF modeli kullanılmakta ve VMF değerleri ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Gerçekte, GMF katsayıları VMF modelinden türetilmekte ve küresel harmoniklere açılmış global grid üzerinde gösterilmektedir.

3. Sayısal Uygulama ve Tartışma

GNSS ile konum belirleme doğruluğunu etkileyen önemli hata kaynaklarından birisi olan troposferik etki, iyonosferik etkinin aksine çok frekanslı GNSS ölçüleri giderilememektedir. Bu bozucu etkinin hesabı için troposferik modeller kullanılmaktadır. GNSS ölçülerinin troposferik düzeltme getirilmeden kullanılması hatalı uydulara uzaklığı ve dolayısıyla hatalı nokta koordinatlarının elde edilmesine yol açmaktadır. Troposferik etkinin farklı

modellerdeki davranışı görmek ve bu modeller arasında karşılaştırma yaparak GNSS ölçü ve hesaplamaları için en uygun model önerisinde bulunabilmek amacıyla Matlab tabanlı bir yazılım hazırlanarak, makalede anlatılmış olan her bir model için hesaplamalar yapılmış ve sonuçlar Tablolar 5,6 ve 7'de sunulmuştur. Hesaplamalarda 6 adet Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı (TUSAGA-Aktif) noktası kullanılmıştır.

Hesaplamalarda 10 Şubat 2020 gününe ait veriler kullanılmıştır. Yukarıda verilmiş olan troposferik etki eşitlikleri incelendiğinde Saastamoinen, Hopfield ve Niell modellerinde her gün için tek bir değer hesaplanabildiği ve VMF modelinde ise zamana bağlı olarak hesaplanabileceği görülmektedir. Tablolar 5, 6 ve 7 incelenirken bu konunun göz önünde tutulması önemlidir. Diğer taraftan, söz konusu Tablolardan görüleceği gibi, troposferik etki uydulara sinyal yükseklik açısına bağlı olarak değişmektedir. Bir başka ifadeyle, uydulara sinyal yükseklik açısı büyüdükçe ve gözlemcinin zenitine yaklaştıkça troposferik etki azalmaktadır. Bu durum, makalenin konusu olan TUSAGA-Aktif noktalarında da 5, 10 ve 15 derecelik uydulara yükseklik açıları hesaplanarak ortaya konmuştur.

Tablo 5. 10 Şubat 2020 için troposferik gecikme değerleri

Nokta Adı	Hesap saati	Troposferik Etki (metre) (Sinyal yükseklik açısı=5 derece)					
		Saastamoinen (Eşitlik 9a)	Saastamoinen (Eşitlik 10a)	Hopfield	Niell	VMF (Epok)	VMF (Grid)
BEYS	12:00	19,9626	29,0520	20,7919	20,9365	21,0742	21,0559
	03:00					21,1261	21,0954
CIHA	12:00	20,4423	30,2776	21,2822	20,9311	21,0703	21,0636
	03:00					21,1221	21,1157
KLUU	12:00	20,3317	29,9822	21,1696	20,9331	21,0711	21,0657
	03:00					21,1230	21,1178
YUNK	12:00	19,9502	29,0192	20,7792	20,9378	21,0742	21,0682
	03:00					21,1261	21,1202
KNY1	12:00	20,2423	29,7524	21,0783	20,9330	21,0719	21,0537
	03:00					21,1238	21,0932
AKHR	12:00	20,3482	30,0274	21,1864	20,9322	21,0710	21,0489
	03:00					21,1229	21,0394

Tablo 6. 10 Şubat 2020 için troposferik gecikme değerleri

Nokta Adı	Hesap saati	Troposferik Etki (metre) (Sinyal yükseklik açısı=10 derece)					
		Saastamoinen (Eşitlik 9a)	Saastamoinen (Eşitlik 10a)	Hopfield	Niell	VMF (Epok)	VMF (Grid)
BEYS	12:00	11,2856	15,8490	11,3066	11,2166	11,2391	11,2336
	03:00					11,2467	11,2395
CIHA	12:00	11,5571	16,4944	11,5746	11,2160	11,2384	11,2344
	03:00					11,2460	11,2420
KLUU	12:00	11,4946	16,3394	11,5130	11,2163	11,2386	11,2346
	03:00					11,2462	11,2422
YUNK	12:00	11,2786	15,8315	11,2996	11,2168	11,2391	11,2351
	03:00					11,2468	11,2428
KNY1	12:00	11,4441	16,2185	11,4631	11,2162	11,2387	11,2332
	03:00					11,2463	11,2391
AKHR	12:00	11,5039	16,3632	11,5222	11,2161	11,2386	11,2322
	03:00					11,2462	11,2309

Tablo 7. 10 Şubat 2020 için troposferik gecikme değerleri

Nokta Adı	Hesap saati	Troposferik Etki (metre) (Sinyal yükseklik açısı=15 derece)					
		Saastamoinen (Eşitlik 9a)	Saastamoinen (Eşitlik 10a)	Hopfield	Niell	VMF (Epok)	VMF (Grid)
BEYS	12:00	7,7291	10,7909	7,7229	7,6358	7,6428	7,6398
	03:00					7,6451	7,6416
CIHA	12:00	7,9151	11,2278	7,9062	7,6356	7,6426	7,6400
	03:00					7,6449	7,6423
KLUU	12:00	7,8723	11,1229	7,8641	7,6357	7,6426	7,6400
	03:00					7,6449	7,6423
YUNK	12:00	7,7243	10,7791	7,7181	7,6359	7,6428	7,6402
	03:00					7,6451	7,6425
KNY1	12:00	7,8376	11,0411	7,8300	7,6357	7,6427	7,6396
	03:00					7,6450	7,6414
AKHR	12:00	7,8786	11,1390	7,8704	7,6357	7,6426	7,6393
	03:00					7,6449	7,6389

Yukarıda da ifade edilmiş olduğu gibi, tablolardaki hesaplamalar üç farklı yükseklik açısında (5,10 ve 15 derece) yapılarak troposferik etkinin uydu-alıcı sinyal yoluna bağlı değişimi de gösterilmek amaçlanmıştır. Bu konuda geçmişte çok sayıda araştırma yapılmış olup, İsviçre Bern Üniversitesinde yapılan hesaplamalarda, nokta konumuna ve yüksekliğine bağlı olarak değişmekle birlikte, deniz seviyesinde standart atmosferik koşullar için farklı yükseklik açılarında troposferik etki ıslak ve kuru bileşen büyüklükleri Tablo 8'deki gibi verilmektedir [13]. Tablo-8'den görüleceği gibi alıcıya gelen GNSS sinyalinin zenit açısı ne

kadar büyükse, bu sinyal atmosferde zenit doğrultusuna göre daha uzun bir yol izleyeceğinden, ΔS_d ve ΔS_w değerleri de o kadar fazla olacaktır. Bu artım miktarı da yaklaşık $1/\cos Z$ kadardır. Bu genel kabul görmüş değerlerin Türkiye'deki herhangi bir ölçü noktası için (makalede BEYS noktası alınmıştır) geçerli olup olmadığı da araştırılmış olup, en bilinen iki model olan Saastamoinen ve Niell modelleri ile hesaplanarak sonuçlar Tablo 9'da verilmiştir. Tablo 9'dan da görüleceği gibi elde edilen sonuçlar Tablo 7'de verilen ve genel kabul görmüş sonuçlarla uyumludur.

Tablo 8. Deniz seviyesinde ıslak ve kuru bileşen büyüklükleri

Zenit Açısı (derece)	Kuru Bileşen Etkisi ΔS_d (metre)	Islak Bileşen Etkisi ΔS_w (metre)
0	2,3	0,2
60	4,6	0,4
80	13,0	1,2
85	26,0	2,3

Tablo 9. BEYS noktası için Saastamoinen ve Niell modeli ile hesap

Zenit Açısı (derece)	Saastamoinen Modeli		Niell Modeli	
	Kuru Bileşen Etkisi ΔS_d (metre)	Islak Bileşen Etkisi ΔS_w (metre)	Kuru Bileşen Etkisi ΔS_d (metre)	Islak Bileşen Etkisi ΔS_w (metre)
0	3,0014	0,0451	1,0000	1,0000
60	6,0029	0,0902	1,9929	1,9966
80	17,2846	0,2596	5,5583	5,6583
85	34,4377	0,5172	10,1774	10,7591

Yukarıda verilen tablolardaki sonuçların yorumu için, Niell modeli doğru olarak kabul edilmiş ve tüm diğer sonuçlar bu model ile karşılaştırılarak yorumlar yapılmıştır. Niell modelinin doğru kabul edilmesinin gerekçesi ise; modern troposferik modellerin temelini oluşturan teoriye sahip olması ve günümüzde yüksek doğruluk isteyen ve özellikle düşük yükseklik açılarındaki en doğru sonuçları veren yöntem olarak tüm bilimsel amaçlı hesaplama yazılımlarında temel olarak kullanılmasıdır [12, 13].

Tablolar incelendiğinde şu sonuçlara varmak olanaklıdır:

- Niell modeli sonuçları doğru kabul edildiğinde VMF ile en uyumlu sonuçlara ulaşıldığı görülecektir, Bu da beklenen bir durumdur.çünkü VMF modelinin temelini Niell modeli oluşturmaktadır.

- Saastamoinen (1972) ve Hopfield (1969) modeli birbirlerine yakın sonuçlar vermiştir, Bu da beklenen bir durum olup, her iki modelin de 1970'li yıllarda oluşturulduğu ve o yıllarda ulaşılan bu doğrulukların hedeflenen amaçlar için yeterli seviyede olduğu dikkate alındığında nedeni açıktır. Bu nedenle, günümüzde bu iki model çok yüksek koordinat doğruluğu istemeyen ve pratik amaçlı uygulamalar için kullanılmaktadır.

- Tablolarda Saastamoinen modeli için iki farklı eşitlik kullanılmıştır. Bunlardan (9a) eşitliği

yükseklik düzeltmesi ile hesaplanan daha doğru sonuç veren model iken, (9b) eşitliği enleme bağlı eşitlik olup, genellikle yüksek doğruluk istenmeyen ve pratik amaçlı uygulamalar için

tercih edilmektedir. Bu nedenle her iki eşitlikle elde edilmiş sonuçlar arasında önemli farklar vardır. Ancak, aşağıdaki maddede de ifade edildiği ve tablolardan da görüldüğü gibi, yükseklik açısı arttıkça bu fark da azalmaktadır.

- Söz konusu tablolar yükseklik açılarına göre karşılaştırıldığında uydu-alıcı sinyali yükseklik açısının ne kadar önemli olduğu ortaya çıkmaktadır.Bu tablolara göre, uydu-alıcı sinyali yükseklik açısı gözlemci zenitine (90 dereceye) yaklaştıkça troposferik etki önemli ölçüde azalmaktadır. Ancak, uygulamada bu sonuçlar bakarak; tüm ölçülerin 90 dereceye yakın uydu verileri ile yapılması sonucu çıkarılmamalıdır. Çünkü, GNSS hesaplamalarında çok sayıda bozucu etki olduğu için bunların tamamının hangi oranda etki yaptığına bakılıp, buna göre bazı etkiler (örn. iyonosferik etki) çok frekanslı ölçü yöntemi ile bazı diğer etkiler ise (örn. troposferik etki) hesaplama ile giderilmektedir. Diğer bir ifadeyle, GNSS ile konum belirlemede temel düşünce; gökyüzünde izlenebilen olabildiğince çok uydudan veri alarak, bunlar içerisinde en sağlıklı verisi olanları seçip, seçilen bu uydu verileri ile konum hesabına geçilmesidir. Bu amaçla, her bir bozucu etki için

farklı çözüm yöntemleri uygulanmaktadır. Sonuç olarak; günümüzde yüksek doğruluk isteyen GNSS uygulamalarında ölçüler sıfır derece yükseklik açısında (izlenebilen tüm uydular anlamında) ve hesaplamalar ise amaca göre 5 veya 10 derece yükseklik açısında yapılmaktadır. Örneğin, troposferik etki nokta yüksekliklerinin doğruluğunu etkilemekte olup, uydu yükseklik açısının büyük seçilmesi nokta yüksekliğinin daha düşük doğrulukla belirlenmesine yol açmaktadır [19].

Her bir model için troposferik etkinin büyüklüğünün hesaplanmasının yanında, troposferik etkinin koordinat hesaplamalarında dikkate alınmaması durumunda sonuç koordinatlardaki etkisi de örnek olarak tek bir nokta için hesaplanmıştır. Genel kural olarak troposferik etkinin yatay koordinatlardaki etkisi göz ardı edilecek kadar küçük olup, ana etkisi yükseklik bileşeni üzerindedir. Troposferik etkinin nokta yüksekliğine etkisine örnek olarak; hem TUSAGA-Aktif hem de uluslararası IGS (International GNSS Service) noktası olan ANKR (Ankara) noktasının TUSAGA-Aktif verilerinden yararlanarak troposferik düzeltme getirilmiş ve getirilmemiş şekilde nokta koordinatları hesaplanmıştır. Bu koordinatlar, ANKR noktasının Harita Genel Müdürlüğü (HGM)

tarafından belirlenmiş hassas koordinatları ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 10'da verilmiştir. ANKR noktasının kullanılmasının nedeni, bu noktanın koordinatlarının çok yüksek doğrulukla biliniyor olmasıdır. Söz konusu Tablo 10 incelendiğinde, troposferik etkinin özellikle nokta yüksekliklerinde çok önemli bozucu etkiye neden olduğu ve bu nedenle GNSS ölçü ve hesaplamalarında mutlaka giderilmesi gerektiği görülmektedir. Diğer taraftan, makale kapsamında yapılmış hesaplamalar ile Harita Genel Müdürlüğü (HGM) tarafından yapılmış hesaplamalarda yükseklik bileşeninin yanında yatay koordinatlarda da cm mertebesinde farklılıklar görülmektedir [20]. Bu farklılık troposferik etki dışında esas olarak, hesaplamalarda kullanılan ölçü tipi (faz veya kod), yörünge bilgisi doğruluğu ile ağ dengeleme modelinden kaynaklanmaktadır. Başka bir ifadeyle; HGM hesaplamalarında nokta koordinatları uluslararası IGS noktalara dayalı (faz ölçüleri ve görelî konum belirleme) olarak hesaplanmakta ve IGS hassas efemeris bilgisi kullanılmaktadır, Makale kapsamında yapılan hesaplamalarda ise mutlak konum belirleme yöntemi ve IGS hassas efemerisi kullanılmıştır. Bu konularda ayrıntılı bilgi [14]'te verilmektedir.

Tablo 10. Troposferik etkinin nokta koordinatlarına etkisi

Troposferik Model	Enlem	Boylam	Elipsoit Y, (metre)
Troposferik Model Yok	39° 53' 14,593"	32° 45' 30,505"	981,72
Saastamoinen	39° 53' 14,596"	32° 45' 30,506"	973,13
Niell	39° 53' 14,596"	32° 45' 30,506"	973,12
ANKR Koordinatları	39° 53' 14,535"	32° 45' 30,492"	976,02

4. SONUÇLAR

GNSS ile konum belirlemede nokta konum doğruluklarını belirleyen çok sayıda faktör vardır. GNSS ölçü ve hesaplamalarını etkileyen hata (uydu geometrisi, atmosferik etkiler, sinyal yansıma etkisi, faz belirsizliği, sinyal kesikliği vb.) kaynaklarının dışında konum belirleme yöntemi de bu faktörlerin önemlilerinden birisidir. Dolayısıyla, ölçü ve hesap yöntemi yüksek doğruluk (mm/cm) isteyen çalışmalarda (jeodezik ve jeofizik amaçlı konum belirleme, yerkabuğu hareketlerinin izlenmesi,

deformasyon analizi, yağışa dönüşebilir su buharı hesabı, jeoit ve datum belirleme vb.) çok önemli hale gelmektedir. Bu bağlamda, yüksek doğruluklu koordinat hesabı için görelî konum belirleme yöntemi ve faz ölçüleri kullanılmaktadır. Bu ölçü ve hesaplamalarda özellikle nokta elipsoit yüksekliğinin doğru hesaplanabilmesi için troposferik etkinin mutlaka düzeltme olarak getirilmesi gerekmektedir. Eğer hesaplamalardan beklenen doğruluk birkaç cm ve üzeri ise hangi modelin

kullanıldığının önemi yoktur. Ancak, eğer deprem tahmini çalışmaları gibi mm doğruluklu sonuçlar elde edilmek isteniyorsa, düşük sinyal yükseklik açılarında (<5°) etkili sonuçlar veren Niell veya VMF modelinin kullanılması en doğru seçenek olmaktadır. Diğer taraftan, günümüzde artık yaklaşık 1-3 metre doğruluklu navigasyon uygulamalarının da çok yoğun olarak kullanıldığı dikkate alındığında, gerçek zamanlı uygulamalarda da troposferik etkinin olabilen en yüksek doğrulukta düzeltme olarak getirilmesinin önemi açıktır. Gerçek zamanlı konum belirleme amaçlı GNSS alıcı yazılımlarında en uygun ve pratik (en kısa sürede sonuç veren) modelin belirlenip kullanılması da bu açıdan önemlidir. Bu makalede ulaşılan sonuçlar göstermiştir ki, enleme bağlı Saastamoinen modeli GNSS alıcı yazılımlarında kullanılabilir pratik ve uygun bir model olarak karşımıza çıkmaktadır.

Kaynakça

- [1] Davis J. L., Herring T. A., Shapiro I. I., Rogers A. E. E. and Elgered G. 1985. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length", *Radio Sci*, 20(6), pp, 1593-1607, doi: 10.1029/RS020i006p01593.
- [2] Herring T. A. 1992. Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data, in *Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*, Netherlands Geodetic Commission Series, 36, The Hague, Netherlands, pp, 157-164.
- [3] Kouba J. 2008. Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1), *J, Geod.*, 82(4-5), pp, 193, 205, doi:10.1007/s00190-007-0170-0.
- [4] Saastamoinen J. 1972a. Introduction to practical computation of astronomical refraction, *Bull, Géodésique*, 46, 383-397.
- [5] Saastamoinen J. 1972b. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites, *Use Artif, Satell, Geod*, 15, 247-251.
- [6] Goad C., Goodman L. 1974. Modified Hopfield Tropospheric Refraction Correction Model [C], *Transactions-American Geophysical Union*, 2000 Florida AVE NW, Washington, DC 20009: A, Geophysical Union, 55(12).
- [7] Hopfield H. S. 1969. Two-quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data, *J, Geophys, Res.*, 74(18).
- [8] Niell A. E. 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay of radio wavelengths," *J, Geophys, Res.*, 101(B2), pp, 3227-3246, doi: 10.1029/95JB03048.
- [9] Böhm J., Werl B. and Schuh H. 2006. Troposphere mapping functions for GNSS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data, *J, Geophys, Res.*, 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629.
- [10] Marini J. W. 1972. Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile [J], *Radio Sci.*, 7(2).
- [11] Böhm J., Niell A., Tregoning P. 2006. Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data, *Geophys, Res, Lett.*, 33(7), L07304, doi:10.1029/2005GL025546.
- [12] Herring T. A., King R. W., Floyd M. A., McClusky S. C. 2018. *GAMIT Reference Manual*, Release 10.7, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology.
- [13] Dach R., Lutz S., Walser P., Fridez P., (Eds). 2015. *Bernese GNSS Software Version 5.2, User manual*, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing, DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.
- [14] Kahveci M. ve Yıldız F. 2019. *Uydularla Konum Belirleme Sistemleri (GNSS): Teori-Uygulama*, Nobel Yayınları, Ankara.
- [15] Wolfgang R, Dick and Daniela Thaller, 2013. *IERS, 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
- [16] Martellucci A., Prieto-Cerdeira R. 2009. Review of tropospheric, ionospheric and multipath data and models for Global Navigation Satellite Systems, 3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), April, Berlin, Germany.
- [17] Böhm J., Schuh H. 2003. Vienna Mapping Functions, In *Proceedings of the 16th EVGA Working Meeting*, 9-10 May, Leipzig, Germany.
- [18] <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/> (Erişim Tarihi: 10.02.2021).
- [19] Kahveci M. 1997. *Türkiye Koşullarında Yapılan GNSS Gözlemlerinde Ortam Etkilerinin Araştırılması*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- [20] Özdemir S. 2016. *TUSAGA ve TUSAGA-Aktif İstasyonlarının Hassas Koordinat ve Hızlarının Hesaplanması Üzerine*. HGM Harita Dergisi, Sayı 155, Syf. 53-81, Ocak 2016.