



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



GNSS KONUM BELİRLEMEDE
TROPOFERİK ETKİ HESAPLAMA
MODELLERİ ÜZERİNE ARAŞTIRMA

Sümevra KİRTİL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Sümeýra KIRTIL tarafından hazırlanan “GNSS KONUM BELİRLEMEDE TROPOSFERİK ETKİ HESAPLAMA MODELLERİ ÜZERİNE ARAŞTIRMA” adlı tez çalışması 13/01/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

.....

Danışman

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

.....

Üye

Prof. Dr. Ekrem TUŞAT

.....

Üye

Doç. Dr. Salih ALÇAY

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Sümeýra KİRTİL

Tarih:13.01.2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

GNSS KONUM BELİRLEMEDE TROPOFERİK ETKİ HESAPLAMA MODELLERİ ÜZERİNE ARAŞTIRMA

Sümevra KİRTİL

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

2022, 50 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

Prof. Dr. Ekrem TUŞAT

Doç. Dr. Salih ALÇAY

Uydularla Konum Belirleme Sistemi (GNSS) günümüze kadar geliştirilmiş en yüksek doğruluklu konum belirleme ve navigasyon sistemidir. Ancak her sistemde olduğu gibi GNSS'nin de zayıf yönleri bulunmaktadır. Diğer bir ifadeyle, GNSS ile elde edilen sonuçları etkileyen bir takım rastlantısal ve sistematik sapmalar (bias) söz konusudur. Bu sapmalar (bozucu etkiler), GNSS kullanılan birçok alanda önemli bir sorun oluşturmaya da özellikle yüksek doğruluk isteyen bilimsel amaçlı çalışmalarda çok iyi modellendirilmesi gerekmektedir. Söz konusu bozucu etkiler; uydu sistemine bağlı sapmalar, alıcı sistemine bağlı sapmalar ve ölçü yapılan ortamdan (atmosfer, sinyal yansıma vb.) kaynaklanan etkiler olarak sınıflandırılabilir. Bu ortam etkilerinden birisi de troposferik gecikme etkisidir. Bu etki, iyonosferik gecikme etkisinde olduğu gibi çoklu frekansa sahip alıcılar kullanılarak giderilememekte, ancak bazı algoritma ve modeller ile giderilebilmektedir. Özellikle son yıllarda 10 derece ve daha küçük yükseklik açılarında hesaplama yapılan troposferik model algoritmaları geliştirilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, GNSS ölçülerini değerlendirme yazılımlarında yaygın olarak kullanılan troposferik modeller incelenmiş, bu modellere ait matematiksel algoritmalar MATLAB (R2020a) platformunda işlenmiştir. Hazırlanan yazılım ile kullanıcı dostu bir arayüz tasarlanmış, çok sayıda hesaplama senaryosu ile kullanıcılara dilediği hesaplamaları yapabilme olanağı sunulmuştur. Tezin sayısal uygulama kısmında 10 Şubat 2020 tarihli 17 adet TUSAGA-Aktif istasyonuna ait veri setleri kullanılmıştır. 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 alıcılarla yapılan konum belirleme amaçlı) uygulamalar içinse geleneksel Saastamoinen ve Hopfield modellerinin kullanılmasının yeterli olduğu belirlenmiştir.

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

ABSTRACT

MSc THESIS

RESEARCH ON TROPOSPHERIC EFFECT CALCULATION MODELS IN GNSS POSITIONING

Sümeýra KIRTIL

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Geomatics Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ

2022, 50 Pages

Jury

**Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ
Prof. Dr. Ekrem TUŞAT
Assoc. Prof. Dr. Salih ALÇAY**

Global Navigation Satellite System (GNSS) is the highest accuracy positioning and navigation system ever developed. However, as in every system, GNSS also has some weaknesses. In other words, there are some random errors and biases (systematic effects) that affect the results obtained with GNSS. Although these errors do not cause a significant problem in some GNSS applications, it should be modeled very well, especially in scientific studies that require high accuracy. These biases and errors may be classified as those originating at the satellites and at the receiver systems and those caused by the measurement environment (signal propagation, multipath, etc.). One of these signal propagation errors is the tropospheric delay effect. This effect cannot be eliminated by using multi-frequency receivers as in the case of the ionospheric delay effect, but it can be eliminated with some algorithms and models. Especially in recent years, tropospheric model algorithms have been developed that provide solutions at elevation angles of 10 degrees and less.

Within the scope of this thesis, tropospheric models which are being widely used in GNSS processing softwares, were examined and the mathematical algorithms of these models were adapted on the MATLAB (R2020a) platform. With the written software, a user-friendly interface has been designed, and users are provided with the opportunity to make any calculations they wish with a large number of calculation scenarios. In the numerical application part of the thesis, data sets of 17 TUSAGA-Aktif (CORS-TR) stations dated February 10, 2020 were used. According to the results obtained, it was determined that the Niell and VMF models gave the most appropriate results in scientific studies that require high accuracy, while the use of traditional Saastamoinen and Hopfield models is sufficient for applications that do not require high accuracy (e.g. for military, navigation and positioning purposes with single frequency receivers).

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

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, değerli bilgilerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam büyük bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenin fazlasını sunan ve gelecekteki mesleki hayatımda da bana verdiği değerli bilgilerden faydalanacağımı düşündüğüm kıymetli danışman hocam Prof. Dr. Muzaffer KAHVECİ'ye teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

Yapmış olduğu çalışmalar hakkında detaylı bilgiler vererek beni aydınlatan ve yoluma ışık tutan sayın Arthur E. Niell'e teşekkürlerimi sunarım.

Araştırmalarım ve çalışmam boyunca bilgi birikimi ile bana yardımcı olan ve psikolojik desteklerini benden esirgemeyen kıymetli nişanlım Emre AYSO'ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan ve her türlü kahrımı çeken biricik aileme minnettarım.

Sümevra KIRTI
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	6
3.1. Atmosfer Tabakaları Hakkında Genel Bilgiler	6
3.2. GNSS Ölçü ve Hesaplarını Etkileyen Hata Kaynakları.....	9
3.2.1. Uydu Efemeris Hatası	9
3.2.2. Uydu Saati Hataları.....	10
3.2.3. İyonosfer Etkisi.....	11
3.2.4. Troposfer Etkisi	12
3.2.5. Sinyal Yansıma (Multipath) Etkisi	12
3.2.6. Alıcı Anteni Faz Merkezi Hatası	13
3.2.7. Seçimli Doğruluk Erişimi	14
3.2.8. Taşıyıcı Dalga Faz Belirsizliği ve Faz Kesiklikleri	14
3.3. Troposfer.....	16
3.3.1. Genel bilgiler	16
3.3.2. Troposferik gecikme etkisi	17
3.3.3. Troposferik gecikme etkisi hesabı için gerekli parametreler ve bu parametrelerin elde edilmesi	20
3.3.4. Troposferik gecikme etkisini belirlemek için kullanılan modeller ve aralarındaki farklar.....	21
4. TROPOSFERİK GECİKME ETKİSİ HESABI YAZILIMI	29
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	34
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
KAYNAKLAR	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ΔS_{trop}	: S sinyali yolu boyunca gecikme miktarı
$N_d(s)$	: Atmosferdeki kuru bileşen
$N_w(s)$	: Atmosferdeki ıslak bileşen
ΔS_d	: Zenit doğrultusunda kuru bileşen etkisi (metre)
ΔS_w	: Zenit doğrultusunda ıslak bileşen etkisi (metre)
ΔS_{trop}^Z	: Troposferik gecikme etkisi (metre)
ΔS_d^Z	: Kuru bileşen gecikme etkisi
ΔS_w^Z	: Islak bileşen gecikme etkisi
Z	: Uydu zenit uzaklığı
P	: Atmosferik basınç (mbar)
T	: Mutlak sıcaklık (C)
e	: Su buharı basıncı (mbar)
B	: Noktanın yüksekliğinden dolayı çizelgeden alınacak katsayı
δL	: Uydu zenit açısına ve nokta yüksekliğine bağlı olarak çizelgeden alınacak olan düzeltme değeri (metre)
ε	: Yükseklik açısı (derece)
$NMF_h(\varepsilon)$	: NMF Hidrostatik indirgeme fonksiyonu
$NMF_w(\varepsilon)$	: NMF Islak Bileşen indirgeme fonksiyonu

Kısaltmalar

C/A	: Coarse/Acquisition
DORIS	: Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
DGPS	: Differential GPS
GMF	: Global Mapping Function
GPS	: Global Positioning System
GNSS	: Global Navigation Satellite System
NMF	: Niell Mapping Function
P Code	: Precision/Protected Code
PPP	: Precise Point Positioning
SA	: Selective Availability
SLR	: Satellite Laser Ranging
SPS	: Standard Positioning Service
TEC	: Total Electron Content
VLBI	: Very Long Baseline Interferometry
VMF	: Vienna Mapping Function

1. GİRİŞ

İlk çağlardan itibaren insanoğlu konumunu ve gitmeyi amaçladığı yere nasıl gideceğini sorgulamış ve bunun cevabını bulmaya yönelik çalışmalar yapmıştır. Bu amaçla birçok sistem geliştirilmiş ve çoğunda sorunlarla karşılaşmıştır. Bu sorunlar ise teknolojinin gelişmesiyle birlikte giderilmeye başlanmıştır. Zamanla teknolojik gelişmelere paralel olarak konum belirleme ve navigasyon sistemlerinde önemli gelişmeler olmuştur.

Şu an kullanmakta olduğumuz modern konum belirleme teknolojisi 1960'lı yıllarda geliştirilmiş TRANSIT (DOPPLER veya Navy Navigational Satellite System; NNSS) olarak bilinmektedir. Ancak, bu sistemden elde edilen sonuçlar jeodezik doğrulukları karşılayamayacak kadar yetersizdi. Bu durum göz önüne alındığında sürekli gözlem yapabilecek, hızlı, pratik ve yüksek doğruluklu konum elde etmeye olanak sağlayacak bir sistem arayışı içine girilmiştir.

Konum belirlemedeki hesaplama yöntemleri ile elektronik ve uzay çalışmalarındaki önemli gelişmeler, 1980'li yıllarda Global Konum Belirleme Sistemi'nin (GPS, Global Positioning System) doğuşuna sebep olmuştur. Geliştirilen bu konum belirleme sistemi insanlık adına yapılan en önemli ve yararlı çalışmalardan biri olarak düşünülebilir. Çünkü bu sistem artık günlük yaşantımızın ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Jeodezik çalışmalar, hava, kara ve deniz araçlarının navigasyonu, deprem tahmini ve deformasyon ölçmeleri, meteorolojik çalışmalar, nesnelerin interneti uygulamaları, cep telefonları, tarım başta olmak üzere çok sayıda sivil ve askeri kullanım alanı örnek olarak verilebilir.

Yukarıda bahsedildiği gibi birçok kullanım alanına sahip olan GPS'in de her sistemde olduğu gibi zayıf yönleri mevcuttur. Başka bir ifade ile GPS ile elde edilen sonuçları etkileyen bazı rastlantısal ve sistematik sapmalar söz konusu olabilmektedir. Bu sapmalar GPS'in günlük kullanım alanlarının birçoğunda doğruluğu kısıtlayıcı sorun oluşturmamaktadır. Ancak bilimsel amaçlı çalışmalarda bu sapmalar ve sapma miktarları çok iyi modellendirilmeli ve kontrol altına alınmalıdır. Bunlar şu şekilde sıralanabilir: uydu bazlı sapmalar, alıcı ve teknik donanımına bağlı sapmalar ve atmosferik koşullara bağlı olan sapmalar (Kahveci ve Yıldız, 2018).

Bu tez çalışması kapsamında söz konusu hata kaynaklarından yalnızca atmosferik etmenlere bağlı olarak ortaya çıkan troposferik gecikme etkisinin sebep olduğu hata kaynağı araştırılmıştır. Troposferik gecikme etkisi hesaplama modelleri,

“scriptler” halinde MATLAB (R2020a) platformunda yazılmıştır. Ayrıca, MATLAB (R2020a)’a ait App Designer platformunda da Grafiksel Kullanıcı Arayüzü (Graphical User Interface, GUI) oluşturularak kullanıcı dostu bir arayüz tasarlanmıştır. Gerekli verilerin girdisi sağlandıktan sonra modellere ait sonuç bilgileri aynı anda elde edilmektedir. Elde edilen sonuçlar çizelgelerle bir araya getirilerek gerekli yorumlamalar, araştırma ve sonuçlar kısmında yapılmıştır. Ayrıca hesaplama sonuçlarından elde edilen grafiklerle, yapılan çalışmaya dair elde edilen sonuç verilerinin anlaşılması sağlanmıştır. Dahası, renk kademeleriyle oluşturulmuş Türkiye haritalarıyla da sonuçlar daha belirgin hale getirilmiştir. Son olarak yapılan bütün çalışmalara dair sonuçlar göz önünde bulundurularak genel bir değerlendirme yapılmıştır.

Tez çalışması toplamda 6 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm giriş, ikinci bölümde kaynak araştırması sonucu yararlanılan kaynaklardan özet bilgiler verilmiştir. Üçüncü bölümde atmosfer ile ilgili temel tanımlar yapılmış, GNSS ölçü ve hesaplarını etkileyen hata kaynakları özetlenmiş, troposferin genel tanımı, troposferik gecikme etkisi ve bu etkiyi belirlemek için kullanılan modeller açıklanmıştır. Bunları takip eden dördüncü bölümde MATLAB ile yapılan yazılım, ekran görüntüleri ile birlikte desteklenerek açıklanmıştır. Ardından beşinci bölümde yapılan yazılım ile elde edilen troposferik etki sonuçları incelenmiştir gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Son olarak altıncı bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilmiş ve tez çalışması tamamlanmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yapılan çalışma için literatür araştırmasında GNSS sistemleri, GNSS sistemine etki eden hata kaynakları, troposferik gecikme etkisi ve modelleri incelenmiş olup aşağıda yapılan araştırma sonuçları ifade edilmiştir.

Bu bağlamda Kahveci ve Yıldız (2018), “GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri” isimli kitap irdelenmiştir. Bu kaynakta uydu jeodezisinin başlangıcından bu yana gelişen süreçlerde yaşanan gelişmelerden, günümüzde yer alan global ve bölgesel konum belirleme sistemlerinin tarihçesinden bahsedilmiştir. En pratik ve hızlı konum belirleme sistemi olan uydularla konum belirleme sistemlerine etki eden hata kaynakları sınıflandırılmış ve bunların giderilme yolları irdelenmiştir. Bu çalışmada, tezin ana konusu olan troposferik gecikme etkisi teorik olarak açıklanmış olup, kısaca modeller arası karşılaştırma yapılmıştır.

Kahveci, (1997), “Türkiye Koşullarında Yapılan GPS Gözlemlerinde Ortam Etkilerinin Araştırılması” adlı doktora çalışmasında GPS ile konumlamada ortam etkilerinin hem mutlak hem de göreceli konum belirleme yöntemlerinde doğruluğu önemli ölçüde sınırladığı saptanmıştır. Troposferik etkiler frekans bağımlı olmadıklarından iyonosferik etkilerde olduğu gibi çift frekansta yapılmış ölçüler kullanılarak giderilememektedir. Dolayısıyla uygulamada bu etki uygun modellendirmeler ile en aza indirilebilmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde, yükseklik farkı belirlemenin önemli olduğu çalışmalarda troposferik etkinin mutlaka dikkate alınması gerektiği sonuç grafikleri ile ifade edilmiştir. Bu çalışmada troposferik etkinin belirleme yöntemleri; farklı mevsimlerde, farklı arazi yapılarında ve kısa kenarlı ağlarda (<20km) denenmiştir. Elde edilen sonuçların özellikle; Kalman filtreleme tekniği ile elde edilecek değerlerle, meteorolojik balonlar veya su buharı radyometresi kullanılarak alınacak sonuçlar ile karşılaştırılması gerektiği düşünülmektedir.

İncelenen bir diğer çalışma ise A. E. Niell (1996)’e ait olan “Global Mapping Functions for The Atmosphere Delay at Radio Wavelengths” isimli makalede, 3 dereceye kadar olan yükseklik açılarına göre elektromanyetik dalga boylarına karşılık gelen zenit gecikmeleri için, hidrostatik ve ıslak atmosferik gecikmenin indirgeme fonksiyonlarını hesaplama yöntemleri geliştirilmiştir. Burada bahsedilen hidrostatik bileşen indirgeme fonksiyonunda bulunan katsayıların hesabı, alıcı noktasının deniz seviyesinden itibaren; yüksekliğine, noktanın enlemine ve yılın gününe (Day Of Year; DOY) bağlıdır. Islak bileşen indirgeme fonksiyonu ise sadece noktanın enlemine

bağılıdır. Bu çalışmada elde edilen indirgeme fonksiyonu atmosferik parametrelerden bağımsızdır. Başka bir ifadeyle bu tür parametreler ile hesaplanan fonksiyonlar doğruluk ve hassasiyet açısından karşılaştırılması gerekirken, atmosferik verilerin bulunmadığı durumlarda karşılaştırma işlemi olmaması bu çalışmada elde edilen indirgeme fonksiyonunu özel kılmaktadır.

Bir diğer kaynak ise Johannes Böhm (2006)'a ait olan “Troposphere Mapping Functions for GPS and VLBI from ECMWF Operational Analysis Data” adlı makale çalışmasıdır. İçerik olarak Jeodezik VLBI ve GPS verilerinin analizinde, ölçü yapılan noktanın zenit hattına göre atmosfer gecikmesinin modellenmesi için kullanılan analitik hesap formülünün, genellikle üç parametrelili sürekli bir kesir olan $1/\sin(E)$ olduğuna değinilmiştir. ECMWF (Avrupa Orta-Aralıklı Hava Tahminleri Merkezi)'nin 2001 yılına ait 40 yıllık analiz (ERA-40) verilerini kullanarak, hidrostatik indirgeme fonksiyonları için sürekli kesir formülünde hesaplanan b ve c katsayıları yeniden belirlenmiştir. Sayısal hava modellerinden elde edilen verilere dayanan geçmişte kullanılan indirgeme işlevlerinden (İzobarik Haritalama İşlevleri IMF (Niell, 2000), Viyana Haritalama İşlevleri (VMF; Vienna Mapping Function) (Boehm ve Schuh, 2004) farklı olarak, elde edilen yeni c katsayıları yılın gününe bağılıdır ve Niell İndirgeme Fonksiyonunun (NMF; Niell Mapping Function) (Niell, 1996) aksine ekvator açısından simetrik olmadığı tespit edilmiştir.

İncelenen bir diğer çalışma ise H. S. Hopfield (1971)'a ait olan “Tropospheric effect on electromagnetically measured range: Prediction from surface weather data” adlı bu çalışmada Hopfield Modeli'ne ait n'nin kırılma indisi olduğu, atmosferik kırılma (n-1)'in yüksekliğe bağılı hesaplanan integral bilgisinin, herhangi bir yükseklik açısında atmosferik etki aralığının tahmini için gerekli olduğu belirtilmiştir. İyonize olmamış atmosfer tabakasında integral hesabı için gerekli olan atmosferik veriler, hava balonu ölçümlerinden elde edilebilir olduğu bulgusuna varılmıştır. Kuru atmosferdeki herhangi bir noktada (n-1), hem basınca hem de sıcaklığa (P/T) bağılı olmasına rağmen, gözlenen kuru kısmının yüksekliğe bağılı integrali sadece yüzey basıncının doğrusal bir fonksiyonudur. Aksine sıcaklığın fonksiyonu olmadığı düşünülmektedir. Teorik model, 2-3 metreden birkaç milimetrelik karesel ortalama hatasıyla (%1'in çok altında) gözlemlenen yükseklik integrallerini karşılaştırır. Diğer taraftan ıslak bileşenin radyo dalgaları için önemli olduğu ancak optik frekanslarda önemli olmadığı saptanmıştır. Bu çalışmada troposferik modelleme hesabında atmosferik verilerin etkisi göz önüne alınarak, atmosferik kırılmanın (n-1) yüksekliğe

bağlı olarak hesaplanan integrali için, herhangi bir yükseklik açısında atmosferik etki aralığının tahmini için gerekli olduğu kanısına varılmıştır.

İncelenen bir diğer çalışma ise J. Saastamoinen (1972)'a ait olan “Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites” adlı çalışmasında Gladstone ve Dale yasasına göre, radyo mikrodalgaları için atmosferik kırılmanın yükseklik integrali $\int (n - 1) dr$ olduğu ve yer yüzeyinden stratosferin en üst noktasına kadar alındığı saptanmıştır ve yer yüzeyinin basıncı ile doğru orantılı olarak kuru bir atmosferde bulunduğu savunulmuştur. Bu teoriye göre, kırılma integralinin, kırılma indisinin yükseklik dağılımı hakkında ayrıntılı bilgi edinilmeden belirlenebileceğini göstermektedir. Bu durumda şimdiye kadar atmosferik modellerde kullanılan kırılma indisine ait formüllerin türetilmesini basitleştirmekle kalmaz, aynı zamanda bunların doğruluğunu da artıracakı düşünülmektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Atmosfer Tabakaları Hakkında Genel Bilgiler

Atmosfer, dünyanın etrafını çevreleyen, güneşten gelen enerjiyi hapsedip uzay boşluğuna geri dönmesini engelleyen gaz kütesidir. Bu gaz kütesi tüm canlılar için yaşamsal bir önem taşımaktadır. Bilimsel verilere dayalı olarak dünyanın yaklaşık 5 milyar yıl önce oluştuğu varsayılmaktadır. Bu oluşumun akabinde belli bir süre içerisinde atmosferin su buharı ve gazlardan oluştuğu düşünülmektedir. 3,5 milyar yıl öncesinde ise bilimsel olarak, atmosferin muhtemelen karbondioksit (CO_2), karbon monoksit (CO), su buharı (H_2O), azot (N_2) ve hidrojen (H_2) gibi gazlardan oluştuğu öne sürülmüştür (URL-1).

Dünyanın uygulamış olduğu yer çekimi kuvveti ile çevresinde tuttuğu atmosfer tabakası, gezegenimizin katmanlarında bulundurduğu gazların yeryüzünden çıkıp bir araya gelmesi ile oluşmaktadır. Ayrıca gezegenimizin dışındaki kaynaklardan da etkilenmiştir.

Atmosfer tabakası gerek basınç gerekse yoğunluk açısından, gezegenimizle benzerlik gösteren diğer gezegenler ile karşılaştırılacak olursa; Mars'a göre yaklaşık olarak 100 kat büyük, Venüs'e göre yaklaşık 100 kat küçüktür. Yalnız içeriğinde bulundurduğu bileşimler açısından bu iki gezegenin atmosfer tabakalarından çok farklıdır ve Güneş sistemi içinde benzeri yoktur diyebiliriz.

Atmosferde gazların çoğunluğu azot ve oksijendir. Sayısal olarak ifade etmek gerekirse bu çoğunluk toplamın yaklaşık %99'unu oluşturur. Bu iki gaz çeşidi yaşamsal faaliyetler adına büyük önem taşımaktadır. Yaşamımız için çok önemli olmasına karşın, bu gazların hava ve hava olayları açısından etkisi çok azdır. Yerden yaklaşık 80 km yüksekliğe kadar olan kısım homosfer olarak adlandırılır ve gazların bu kısımda temel özellikleri değişmez. Homosferden sonra gelen kısma ise heterosfer denir ve bu kısımda gazlar molekül ağırlıklarına göre ayrılmaya başlar. Atmosfer içerisinde yerden yukarıya doğru olan bölgedeki sıcaklık değişimleri, yere yakın olan kısımda yani yaklaşık yerden 9-12 km'ye kadar olan bölgede önemli meteorolojik olaylara yol açar.

Atmosfer tabakası kendi içinde, belli aralıklarda çeşitli tabakalardan oluşmaktadır. Tabakaların birbirinden ayrılmasının temel sebebi, gazların her bir tabakada farklı yoğunlukta olması ve bileşenlerinin farklılık göstermesidir. Atmosfer toplamda 5 tabakadan meydana gelmektedir. Bu tabakalar yerden yukarı doğru sırasıyla; troposfer, stratosfer, mezosfer, termosfer, iyonosfer ve ekzosferdir (URL-1).

Troposfer, atmosfer tabakasının yeryüzüne değen kısmıdır. Diğer tabakalara oranla en yoğun gaz oranına sahiptir. Troposfer tabakasının kalınlığı yaklaşık olarak 16-17 km civarındır ve kalınlığı enlemlere göre değişiklik göstermektedir. 45° enlemde 12 km civarında iken, kutuplarda 9 ila 10 km arasındadır. Bu değişikliğin temel sebebi ise ısınn ekvatorda ve kutuplarda değışik durumlarda olmasından kaynaklanmaktadır. Ekvatorda ısı hafifler, yükselir ve merkezkaç kuvveti etkin olur. Kutuplarda ise tam aksine ısı soğur, çöker ve merkezkaç kuvveti etkin değildir. Bu durumda tabaka kalınlığı değışiklik gösterir.

Atmosfer tabakaları içinde büyük öneme sahip olan troposfer, atmosferde bulunan gazların %70 ini ve su buharının tamamını içinde bulundurmaktadır. Hava olaylarının bütünü troposfer tabakasında meydana gelmektedir. Güneş ışınlarının yerden yansması sonucu bu tabaka ısınır ve dolayısıyla atmosfer tabakalarının içinde bulunan en sıcak tabaka olarak nitelendirilebilir. Sıcaklık yerden yükseldikçe her 200 metrede 1 derece azalmaktadır.

Stratosfer; troposfer tabakasından hemen sonra gelen katmandır. Kalınlığı yaklaşık 50 km civarındadır. Yatay hava hareketleri olarak adlandırdığımız rüzgarlar bu katmanda meydana gelir. Rüzgarlar sadece bu tabakada gerçekleşir ve bunun sonucunda diğer tabakalar ile stratosfer arasında bir taşınım söz konusu olmaz. Katmanın sıcaklık derecesi -45'tir ve sıcaklık değışimi görülmemektedir. Tabakada bulunan cisimler gerçek ağırlıklarını kaybederler. Bunun sebebi ise yerçekiminin azalmasından kaynaklanır. Stratosferin üst kısımlarında ozon gazları mevcuttur ve bu sayede güneş ışınları tabakaya çekilerek ısınmanın kolaylaşmasını sağlar.

Mezosfer; stratosfer tabakasından sonra gelir ve yaklaşık 50 km'ye kadar uzanmaktadır. Mezosfer tabakası iki kısımdan oluşmaktadır. Bunlar ozonosfer ve kemosterdir. Ozonosferde; ozon gazları mevcuttur ve bu ozon gazları sayesinde güneşten gelen ultraviyole ışınlar tutulur. Bu sayede canlılar için koruyucu görev üstlenmektedir. Diğer kısım olan kemosterde ise yine aynı şekilde zararlı ışınların bir kısmı tutulur. Ek olarak bu kemosterde gazlar iyonlarına ayrılmaya başlamaktadır (URL-1).

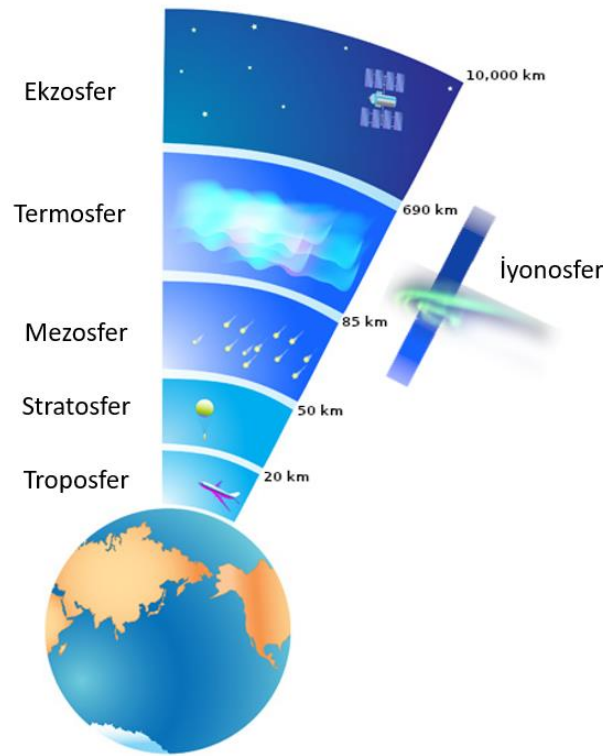
Termosfer; ekzosfer ile mezosfer arasında bulunan bir katmandır. İsminde bulunan 'Termo' kısmı ısı anlamına gelmektedir. Atmosferin bu katmanında sıcaklık 2000°C kadar ulaşabilmektedir. Buna rağmen katmanda ısıyı iletecek miktarda gaz molekülleri bulunmamaktadır. Aynı zamanda bu durum ses dalgalarının geçmesi adına da yeterli molekül olmadığı anlamına gelmektedir. Termosferin yaklaşık olarak kalınlığı

513 kilometre civarındadır. Atmosferin iç katmanlarına göre daha kalın olup, ekzosfer kadar da kalın değildir (URL-9).

İyonosfer; mezosfer, termosfer ve ekzosfer ile örtüştüğü yerler vardır (URL-9). Hava moleküllerinin iyonlarına ayrılmış halde bulunan ve elektrik iletkenliği kazanan atmosfer bölgelerinin tümüdür. Katmanda bulunan serbest elektron miktarı, radyo frekanslarından yayınlanan elektromanyetik dalgaların yayılmasını değiştirecek kadar çoktur. Sonuç itibariyle iyonosfer, elektromanyetik dalgaların yayılımını etkileyebilecek miktarda serbest elektron yoğunluğuna ev sahipliği yapan üst atmosfer tabakası (~70-3000 km) olarak tanımlanabilir. Bahsedilen iyonlaşma ve serbest elektron miktarı direkt güneş ışımasına yani radyasyon yoğunluğuna bağlıdır. Buradan çıkartılabilecek sonuç ise, elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkinin, gecenin ve gündüzden daha az şekilde meydana geleceği, gündüz ise etkinin daha çok olacağı anlamına gelmektedir (Kahveci,1997).

Bu katmanları birbirinden ayıran sınırlar mevcuttur ve bu sınırlar sırasıyla; tropopoz, stratopoz ve mezopoz olarak adlandırılmaktadır.

Şekil 3.1.'de katmanlar şema ile gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Atmosfer katmanları (URL-2)

Atmosferde bulunan kimyasal bileşenler arasında meteorolojik bakımdan en önemli olanı su buharıdır. Su buharı, toplu su birikintilerinin yüzeyinde meydana gelen buharlaşma sonucu oluşur. Ayrıca bitkilerin terlemesiyle de meydana gelmektedir. Bundan dolayı, yükseklik açısı arttıkça hava içerisinde mevcut olan su buharı miktarı hızla azalmaktadır. Mevcut olan su buharının neredeyse dörtte üçlük kısmı 4 km'nin altında bulunmaktadır. Geçiş katmanı olan tropopozun üzerinde hava tamamen kurudur.

3.2. GNSS Ölçü ve Hesaplarını Etkileyen Hata Kaynakları

GNSS (Global Navigation Satellite System); üç boyutlu, gerçek zamanlı ve global bir koordinat sisteminde, yüksek doğruluklu konum belirleme ve navigasyon sistemi olarak kullanılmasına rağmen, her sistemde olduğu gibi GNSS'nin de bazı zayıf tarafları bulunmaktadır. Bu zayıf noktaların bazı rastlantısal ve sistematik sapmaları üç başlık altında; uydu bazlı sapmalar, alıcı ve teknik donanıma bağlı sapmalar ve atmosferik etmenlere bağlı olan sapmalar olarak ifade edilebilir. Bu sapmalar başka bir deyişle hatalar aşağıdaki gibi sıralanabilir (Kahveci ve Yıldız, 2018);

- Uydu efemeris hataları
- Uydu saati hataları
- İyonosferik etki
- Troposferik etki
- Sinyal yansıma (Multipath) etkisi
- Anten faz merkezi hataları
- Taşıyıcı dalga faz belirsizliği (Ambiguity) ve faz kesiklikleri (Cycle Slips)
- Seçimli Doğruluk Erişimi (SA)

3.2.1. Uydu Efemeris Hatası

Uydu yörünge bilgileri (Kepler yörünge parametreleri) GPS Navigasyon Mesajı içerisinde yer almaktadır. Bu bilgilerin doğruluğunun az olması veya kasıtlı bir şekilde hatalı yayınlanması gibi durumlarda ortaya çıkan hata kaynağına efemeris hatası denmektedir. Bu hata kaynağı uydu yörünge bilgileri modellenerek en aza indirilebilir,

ancak bu GNSS kullanıcısına ilave bir yük getirmenin yanında uzmanlık isteyen bir konudur. Bu nedenle, jeodezik amaçlı çalışmalar gibi yüksek doğruluk isteyen mühendislik uygulamalarında uluslararası GNSS servisi IGS (International GNSS Service) tarafından yayınlanan hassas efemeris bilgileri kullanılmaktadır. IGS efemerislerin doğruluğu birkaç cm seviyesinde olup bu bilgilere internet üzerinden erişim sağlanmaktadır (IGS, 2021).

Uluslararası GNSS Servisi (International GNSS Service, IGS), 80'den fazla ülkede 200'den fazla kuruluşun katılımcı olduğu gönüllü bir sivil toplum örgütüdür (Dow ve ark., 2009). Kalıcı ve sürekli olarak çalışan 300'den fazla GNSS istasyonundan oluşan IGS küresel izleme ağı, hassas yörünge ve saat çözümleri gibi ürünlerini IGS veri merkezlerine sunarak zengin bir veri seti sağlamaktadır. Aşağıdaki Çizelge 3.1.'de IGS yörünge, doğrulukları ve elde etme süreleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. IGS yörünge doğrulukları (URL-8)

Yörünge	Doğruluk	Elde Etme Süresi
Yayın Efemerisi (Broadcast)	~100 cm	Gerçek zamanlı (günlük)
IGS Ultra Hızlı (hesaplanmış)	~5 cm	Gerçek zamanlı (15 dk aralıklı)
IGS Ultra Hızlı (gözlenmiş)	~3 cm	3-9 saat sonra (15 dk aralıklı)
IGS Hızlı	~2,5 cm	17-41 saat sonra (15 dk aralıklı)
IGS Sonuç	~2,5 cm	12-18 gün sonra (15 dk aralıklı)

Kontrol merkezi aracılığıyla uydudan yayınlanan mesaj ise yayın efemerisidir. Bu mesaj, yörünge bilgileri ve uydu saati ile ilgili bilgilere sahiptir. Kullanıcının yeryüzü üzerinde konum belirlemek amacıyla yaptığı işlemde uydu konumlarına ve uydu sistem zamanına gerçek zamanlı erişime sahip olması gereklidir (Kim ve Kim, 2015). Uydudan yayınlanmakta olan navigasyon mesajı uyduların kontrol bölümü tarafından belirlenmekte olup, GPS uyduları aracılığıyla kullanıcılara yayınlanmaktadır (Hofmann-Wellenhof ve ark., 2008).

3.2.2. Uydu Saati Hataları

Konum belirleme sisteminin temelini zaman ölçümü oluşturmaktadır. Dolayısıyla, uydu saati hatası GNSS ile konum belirlemede en önemli hata kaynağıdır. Uydu saati hatası uydunun sahip olduğu yönden bağımsız olmakla birlikte, kullanıcının

ölçü yaptığı bütün noktalarda bulunan alıcılar için eşit büyüklüktedir. P (Precision/Protected) kod ve C/A (Coarse/Acquisition) kod kullanıcıları içinde aynı etkiye sahiptir. Uydu saat hatalarının temel dayanağı aslında SA (Selective Availability) (clock dithering) etkisidir. SA etkisi artık uygulanmamakta ve GPS uydularında stabilitesi yüksek atomik saatler kullanılmaktadır. Bunun sonucunda uydu-alıcı uzaklığındaki hataların temel kaynağı olarak uydu-alıcı saatlerinin GPS zamanına göre yeterli doğrulukta senkronize edilmemesi gösterilmektedir. Uydu saati hatası uyduya ait Kontrol Bölümü tarafından sürekli olarak izlenmekte olduğu bilinmektedir ve yayın efemerisi saat düzeltmeleri de Navigasyon Mesajına ait bir bölüm olarak her gün yüklenmektedir. Bu yapılan düzeltmelerin temel amacı, uydu-alıcı uzaklığının elde edilmesindeki toplam hatayı minimuma indirmektir. Bunun için uydu saatleri ile GPS zamanı arasındaki yaklaşık olarak 30 nanosaniyelik olan senkronizasyonu sağlamaktır (Kahveci ve Yıldız, 2018).

3.2.3. İyonosfer Etkisi

Atmosferin katmanlarından biri olan iyonosferde, hava molekülleri çok yoğundur ve bu katmanda elektrik iletkenliği mevcuttur. İyonosferde atomlardan kopmuş halde bulunan çok fazla elektron mevcuttur ve bu durum elektromanyetik dalgaların yayılmasını değiştirecek güçtedir.

Elektromanyetik dalgaların yayılması üzerindeki iyonosfer etkisine Toplam Elektron Yoğunluğu (TEC) denmektedir. Uydu-alıcı arasındaki sinyal yolu üzerinde her m^3 üzerinde bulunan toplam elektron miktarı olarak ifade etmekte mümkündür. Yerel zamana göre, 14:00 sularında günlük değer bakımından maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Gece boyunca, yani sabah 05:00 sularına kadar ise minimum seviyelere inmektedir. Bu durum karşısında, gündüz saatlerinde iyonosferik etki 50 nanosaniye yani yaklaşık 15 metre iken, gece saatlerinde 10 nanosaniye yani 3 metre civarındadır.

GNSS ile temelde iki farklı büyüklüğe gözlem yapılması söz konusudur. Bunlar kod ve faz ölçüleridir. Aynı şekilde iyonosferin etkisi de iki ölçü üzerinde farklı şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu farklılıklar, kod ölçüleri için iyonosferik grup gecikme etkisi (group delay) iken, faz ölçüleri için faz hızlanması (phase advance) şeklinde olmaktadır.

İyonosferik etki radyo dalgaları üzerinde dağıtıcı bir etkiye sahip olup bu etki radyo dalgalarının frekansına göre değişiklik göstermektedir. Başka bir ifadeyle, iyonosferik etki frekans bağımlı olup her frekansta farklı büyüklüğe sahiptir. Bu

nedenle, tek frekanslı GNSS alıcıları ile gerçek zamanlı konum belirleme amaçlı ölçü ve hesaplamalarda navigasyon mesajı içerisinde yayınlanan Klobuchar veya Nequick iyonosferik model katsayıları kullanılmakta ve böylece söz konusu etkinin yaklaşık olarak %50'si giderilebilmektedir. Bu nedenle, yüksek doğruluk gereken çalışmalarda çok frekanslı alıcılar kullanılarak bu etki büyük oranda giderilebilmektedir (Kahveci ve Yıldız, 2018).

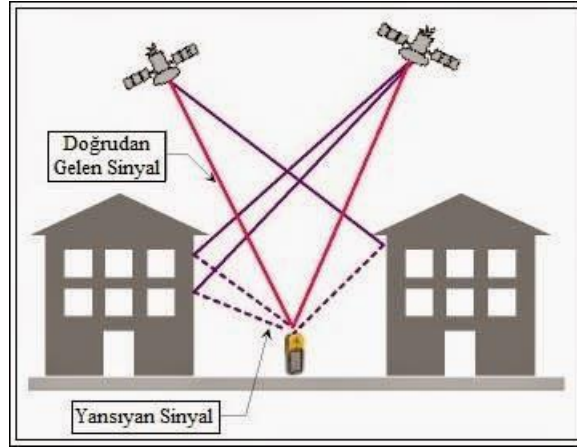
3.2.4. Troposfer Etkisi

Troposferik gecikme etkisi sinyal frekansına bağlı olmadığı için iyonosferik etkide olduğu gibi çok frekanslı alıcılar kullanılarak giderilememektedir. Bu etki sadece modelleme ve hesaplama ile giderilebilmektedir. Troposferik etki bu tez çalışmasının ana konusu olduğu için bununla ilgili bilgi Bölüm 3.3'te ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

3.2.5. Sinyal Yansıma (Multipath) Etkisi

GNSS ile ölçüm yaparken kullanılan antenlerin neredeyse tamamı her yönden gelen uydu sinyallerini eş zamanlı olarak alabilmektedir. Antenin kurulmuş olduğu arazinin yapısına göre kaydedilen sinyallerin içine beklenmedik şekilde yansıyan sinyallerde karışabilmektedir. Bu durum sinyal yükseklik açısına bağlı olarak da meydana gelmektedir.

Yeryüzünde herhangi bir yerde nokta üzerinde kurulmuş olan antene bir veya birkaç yolu takip ederek ve ana sinyale karışarak gelen uydu sinyallerinin yol açtığı bu duruma sinyal yansıma (multipath) etkisi denir. Sinyal yansıması uydu ve alıcının ikisi için de söz konusudur. Bu nedenle, sinyal yansımaları, uyduların yol açtığı (satellite multipath) ve alıcı anteninin çevresindeki yansıtıcı yüzeylerin sebep olduğu yansımalar (antenna multipath) olarak ikiye ayrılmaktadır. Uydulardan kaynaklanan hata, kısa kenarlı ağlarda (yaklaşık olarak 200 km'den küçük bazların her iki ucunda) bulunan antenler için eşit büyüklüğe sahip olmaktadır. Bu durumda göreceli konum belirleme yöntemi ile bu hata türü büyük ölçüde giderilebilmektedir. Alıcının maruz kaldığı sinyal yansıma etkisi Şekil-3.1.'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Alıcının maruz kaldığı sinyal yansıma etkisi (URL-4)

Alıcı antenin çevresindeki yansıtıcı yüzeylerin sebep olduğu yansımalarla söz konusu yansıtıcı yüzeyler ise; yapılar, park halindeki araçlar, su yüzeyleri ve diğer yansıtıcı yüzeylerdir. Sinyal yansıma etkisi ile dalga boyu orantılı olarak değişiklik göstermektedir. Bu bozucu etkinin sebep olduğu hata P kod için taşıyıcı dalga fazına göre daha fazladır (Kahveci ve Yıldız, 2018).

3.2.6. Alıcı Anteni Faz Merkezi Hatası

GPS sinyallerinin alıcı anteninde ulaştığı nokta, alıcı anteni faz merkezi olarak adlandırılmaktadır. Genel olarak antenin fiziksel faz merkezi, geometrik faz merkezine göre farklılık oluşturmaktadır. Anten faz merkezi hatası antenin yapısına bağlı olarak 1-2 mm ile 1-2 cm arasında değişiklik göstermektedir. Bu nedenle yüksek doğruluk isteyen çalışmalarda anten faz merkezi hatasının mutlaka dikkate alınması gerekmektedir.

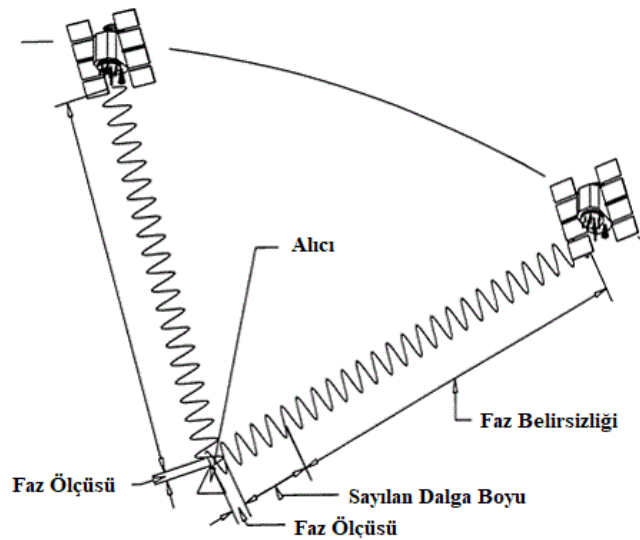
Anten faz merkezi hatasının giderilmesinde en pratik yöntem eş zamanlı GNSS ölçüsü yapılan tüm alıcı antenlerinin aynı doğrultuya (örneğin kuzeye) yönlendirilmesidir. Ayrıca, anten faz merkezinin yükseklik bileşeninde olası bir hatadan kaçınmak için, arazide yapılan anten yüksekliği ölçümleri antenin yapısına bağlı olarak en az iki farklı yerinden ölçülerek bu hatanın en az seviyeye indirgenmiş olması gerekmektedir (Kahveci ve Yıldız, 2018).

3.2.7. Seçimli Doğruluk Erişimi

SA (Selective Availability) kısaltması ile kullanılan Seçimli Doğruluk Erişimi; yetkisi olmayan kullanıcıların, GPS'in sağlamış olduğu doğruluklara erişmesini önlemek için bu doğrulukların ABD tarafından kasıtlı olarak kötüleştirilmesi olarak tanımlanabilir. SA, özellikle kod ölçüleriyle gerçek zamanlı konum belirleme için geçerlidir. SA, 25 Mart 1990 tarihinde uygulamaya başlanmış, 1 Mayıs 2000 tarihi ile artık uygulamadan kalkmıştır (Kahveci ve Yıldız, 2018).

3.2.8. Taşıyıcı Dalga Faz Belirsizliği ve Faz Kesiklikleri

Taşıyıcı dalga faz gözlemlerinde temelde kod ile faz gözlemleri aynıdır. Ancak kod gözlemlerinde kodun 'chip' uzunluğu ölçülürken, faz gözlemlerinde taşıyıcı dalga boyları sayılır (Kahveci ve Yıldız, 2018). Aşağıda verilen Şekil 3.2.'de taşıyıcı dalga faz belirsizliği gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Taşıyıcı dalga faz belirsizliğini gösteren şema (URL-4)

GNSS alıcısı faz ölçüsünü kaydetmeye ilk başladığı anda alıcı, sinyalin dalga boyunun hangi bölümünü kaydettiğini bilemez. Başka bir ifadeyle, başlangıç anındaki ilk ölçü epogunda uydu alıcı arasındaki taşıyıcı dalga fazının kaç tane tam dalga içerdiği

bilinmemektedir. Bu bilinmeyen kısım Taşıyıcı Dalga Faz Başlangıcı Belirsizliği (Initial Phase Ambiguity) olarak tanımlanmaktadır (Kahveci ve Yıldız, 2018).

Yüksek doğruluk isteyen uygulamalar için kod gözlemleri yerine taşıyıcı faz gözlemlerinin kullanılması daha uygundur. Çünkü taşıyıcı faz gözlemleri, kod gözlemlerinden çok daha hassastır. Diğer taraftan taşıyıcı faz gözlemleri bilinmeyen belirsizlikleri içerir. Eğer bu belirsizlikler doğru bir şekilde çözülebilirse taşıyıcı faz gözlemleri belirsiz olmayan gözlemler haline gelir ve birkaç milimetre düzeyinde doğruluk elde edilmiş olur (URL-6).

Taşıyıcı dalga faz belirsizliğinin çözümü görelî konum belirleme yöntemlerinde çoğunlukla ikili fark gözlemleri ile giderilmekte ve bu sayede uydu saat hataları, alıcı saat hataları ve önemli ölçüde tamsayı belirsizliği ve sinyal kayıklıkları elimine edilmektedir. Mutlak konum belirleme yönteminde ise fark alma teknikleri uygulanamadığı için özellikle tamsayı belirsizliği çözümünde ve yakınsama süresinde önemli zorluklar yaşanmaktadır. Bu nedenle, mutlak konum belirleme yönteminin bir çeşidi olan Hassas Nokta Konum Belirleme’de (PPP, Precise Point Positioning) tamsayı belirsizliğinin güvenle çözülebilmesi için pek çok yöntem geliştirilmiş ve günümüzde de geliştirilmeye devam edilmektedir (Öcalan, 2015).

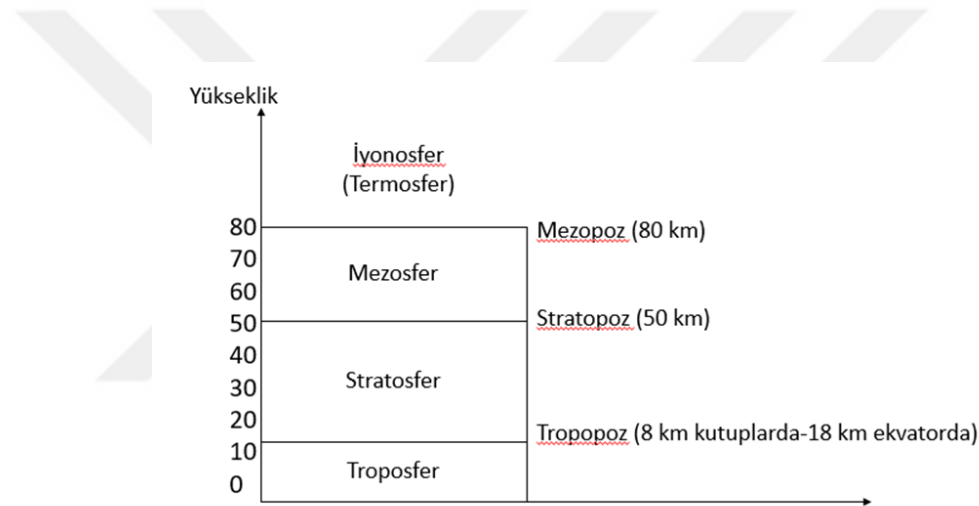
Diğer taraftan, GNSS ile ölçüm yapılırken alıcı anteninin uydu sinyallerini almasında herhangi bir sorun yaşanması halinde meydana gelecek olan sinyal kesikliklerine faz kesiklikleri ya da faz kayıklıkları (cycle slips) olarak adlandırılmaktadır. Bu gibi durumlar söz konusu olduğunda, uydudan yayınlanan sinyalde meydana gelen kesikliğin başladığı andan itibaren yapılan gözlemlere, kayma miktarı kadar düzeltme getirilmelidir. Faz kesiklikleri yaşanmasının temelinde, ölçüm yapılan nokta etrafındaki bina, köprü, ağaç topluluğu, dağ vs. uydu sinyallerinin alıcıya ulaşmasını engelleyen nesneler, kötü iyonosferik şartlar, sinyal yansıma etkisi ve alıcı yazılımında meydana gelebilecek arızalar şeklinde sıralanması mümkündür (Kahveci ve Yıldız, 2018). Bir faz kesikliği tespit edildiğinde bu durum iki şekilde ele alınabilir. Birinci yol, faz kesikliğini doğru bir şekilde düzeltebilmektir. Diğer yol ise faz ölçümlerinde bilinmeyen belirsizlik parametresini yeniden başlatmaktır. Birinci teknik, faz kesikliğin boyutunun kesin bir tahminini gerektirir ve anlık olarak uygulanabilir. İkinci çözüm daha güvenlidir ancak zaman alıcıdır ve hesaplama açısından daha karmaşıktır (URL-7).

3.3. Troposfer

3.3.1. Genel bilgiler

GNSS uydularından yayınlanan sinyaller, öncelikle uzay boşluğunda ilerler. Ardından dünyayı çevreleyen atmosfer tabakasından geçerler. Atmosfer tabakasından geçerken ilk uğradıkları kısım iyonosfer tabakasıdır. Bu tabakada sinyallerin ilerleme hızları frekanslarına bağlıdır. Bu nedenle, iyonosfer tabakasında sinyaller üzerinde oluşan bozucu etki çok frekanslı alıcılar kullanılarak maksimum seviyede giderilebilmektedir.

İyonosfer tabakasından geçen sinyaller sırasıyla mezosfer, stratosfer ve troposfer tabakalarından ilerler (Şekil 3.3.).



Şekil 3.3. Sinyallerin atmosfer sırasıyla izlediği tabakalar (Kahveci, 1997)

Troposfer tabakası, hava olaylarının gerçekleştiği, atmosferin yeryüzü ile teması olan en alt tabakasıdır. Kalınlığı ekvatorda daha fazla, kutuplarda daha az olmakla birlikte yaklaşık olarak 6-18 km civarındadır. Hava olaylarının gerçekleştiği kısım olarak tanımladığımız troposferde, bu olaylar yeryüzünden itibaren 3-4 km'lik alt kısımlarında gerçekleşmektedir. Bu kalınlığın üzerine çıktıkça havadaki nem miktarı azalacağından atmosferik olaylar pek görülmez.

İyonosfer, atmosfer tabakasının elektrik yüklü (iyonize olmuş) kısmını oluşturması sebebiyle bu katmanda yoğun miktarda serbest elektron mevcuttur. Bu elektronlar radyo frekanslarını dağıtıcı özelliğe sahiptir. Şekil 3.3.'de görülen stratosfer ve troposfer tabakaları elektrik yüklü değildir. Böyle olduğu için radyo frekanslarını dağıtıcı özelliğe sahip değildir. Diğer taraftan troposferik etki radyo dalgalarının

frekansına bağımlı olmadığı için hem faz hem kod ölçüleri üzerindeki etkisi eşittir ve GNSS alıcılarının çift frekans özelliğinden yararlanarak bu etkiyi gidermek olanaklı değildir. Troposferik etki doğrudan giderilemediği için mevcut modellerden biri kullanılarak hesaplanması olanaklıdır.

Troposferik etki günümüzde kullanılmakta olan GPS, VLBI (Very Long Baseline Interferometry), DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite), SLR (Satellite Laser Ranging) ve uydu altimetrisi (TOPEX, POSEIDON ve SEASAT uyduları) gibi modern uydu tekniklerinde en önemli bozucu etkilerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır (Kahveci, 1997).

3.3.2. Troposferik gecikme etkisi

Atmosfer tabakaları içerisinde nötr (iyonize olmamış) özelliğe sahip olan troposferin, radyo frekanslarından yayılan elektromanyetik dalgalar üzerindeki bozucu etkisine troposferik gecikme etkisi ya da troposferik refraksiyon ismi verilmektedir. Atmosferin nötr olmasıyla elektromanyetik dalgaların hızının ve yönünün değişmesi söz konusudur. Ayrıca elektromanyetik dalganın yavaşlamasına ve eğilmesine yol açar. Her iki etkinin neden olduğu gecikme, uydu ve alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca ortam kırılma indisinin (n) değişimine bağlıdır. Bu gecikme miktarı 'S' sinyal yolu boyunca,

$$\Delta S_{trop} = \int_a^b (n - 1) dS + (S - G) \quad (3.1)$$

olarak yazılabilir (Kahveci ve Yıldız, 2018). Zenit doğrultusundaki gözlemlerde (3.1) eşitliğinde bulunan S ve G parametreleri birbirine eşit kabul edilir. Elektromanyetik dalganın eğilmesi durumunda meydana gelecek olan etkiyi gösteren (S-G) terimi çok küçük değerlerde olduğu için göz ardı edilebilir. Bu durumda hesaplama, eşitliğin integralinin alınması haline dönüşür. Sonuç olarak troposferik gecikme etkisi,

$$\Delta S_{trop} = \int_a^b (n - 1) dS \quad (3.2)$$

olarak yazılabilir. Bu eşitlikte kırılma indisi (n) çıkarılıp yerine kırıcılık (N) indisi kullanılırsa (3.2) eşitliğinin yeni hali,

$$\Delta S_{trop} = 10^{-6} \int_a^b N(s) dS \quad (3.3)$$

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

olacaktır. (3.3) eşitliğindeki atmosferik kırılma $N(s)$; ısı, basınç ve su buharının bir fonksiyonu olarak,

$$N(s) = k_1 \cdot \frac{P_d}{T} + k_2 \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \quad (3.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu eşitlikte bulunan P_d , kuru havanın toplamdaki atmosferik basıncını, e , su buharı kısmi basıncını (mbar) ve T , Kelvin biriminde atmosferik sıcaklığı ifade etmektedir. k_1, k_2, k_3 katsayıları aşağıdaki Çizelge 3.1. de verilmiştir (Kahveci ve Yıldız, 2018).

Çizelge 3.1.: 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 gaz karışımı (kuru hava ve su buharı) olarak düşünülürse (3.4) eşitliği,

$$N = N_d(s) + N_w(s) \quad (3.5)$$

$$N_d(s) = 77.6 \left(\frac{P}{T} \right) \quad (3.6)$$

$$N_w(s) = 3.73 \times 10^5 \left(\frac{e}{T^2} \right) \quad (3.7)$$

şeklinde temelde iki ana bileşene ayrılmak üzere ifade edilmektedir. Burada $N_d(s)$ kuru bileşeni, $N_w(s)$ ıslak bileşene karşılık gelmektedir.

Troposferik gecikme sonucu elde edilen etkinin yaklaşık olarak %90'ını kuru bileşen, kalan %10'luk kısmı da ıslak bileşenden meydana gelmektedir. Kuru bileşen $N_d(s)$ 'nin troposfordeki değişimleri oldukça küçük oranlarda olup 40 km ve daha yukarılarda gözardı edilebilecek şekilde küçülür. Islak bileşen, $N_w(s)$ 'nin ise yeryüzüne yakın yükseklikler (0-5 km) için önem arz etmektedir. Bileşenlerin zenit açısının değişimine bağlı olarak büyüklükleri Çizelge 3.2.'de verilmektedir.

Çizelge 3.2.: Islak (ΔS_w) ve kuru (ΔS_d) bileşenlerin 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

Çizelge 3.2.' de görüldüğü üzere, GNSS sinyalinin sahip olduğu zenit açısı büyüdükçe, gelen sinyalin atmosferdeki zenit doğrultusuna göre alacağı yol miktarı da daha uzun olacaktır. Bu durum, doğrudan ΔS_d ve ΔS_w değerlerinin artış göstermesine yol açacaktır. Bu artış miktarı da yaklaşık olarak $1/\cos(Z)$ kadardır (Kahveci ve Yıldız, 2018).

Troposferik gecikme, GNSS sinyalinin troposfer katmanında aldığı yola bağlı olduğu gibi, ayrıca uyduya bağlı olan zenit açısının da bir fonksiyonu olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu nedenle, özel amaçla (bilimsel araştırma vb.) yapılmayan standart GNSS gözlemlerinde ve değerlendirmelerde uydu sinyali yükseklik açısı 10 derece ve daha yukarısı seçilmektedir. Daha küçük açıların tercih edilmesi sinyal yansıma etkilerine yol açacaktır.

Zenit doğrultusunda elde edilen gecikme miktarlarından yararlanılarak herhangi bir aralıkta zenit açısının doğrultusuna bağlı değerin elde edilmesini sağlayan $1/\cos(Z)$ fonksiyonuna indirgeme fonksiyonu (mapping function) adı verilmektedir. $1/\cos(Z)$ fonksiyonu deneysel yollarla elde edilen bir fonksiyon olup, farklı araştırmacılar tarafından çok sayıda ve farklılıkta indirgeme fonksiyonları elde edilmiştir. ΔS_d zenit doğrultusundaki kuru bileşeni, ΔS_w zenit doğrultusundaki ıslak bileşeni ifade ederken, f_d ile f_w bu bileşenler için indirgeme fonksiyonlarını göstermek üzere troposferik gecikme etkisi,

$$\Delta S_{trop}^Z = f_d \cdot \Delta S_d^Z + f_w \cdot \Delta S_w^Z \quad (3.8)$$

ile ifade edilebilir. f_d ile f_w için örnek olarak,

$$f_w = \frac{1}{\sin E + \frac{0.00035}{0.0170 + \tan E}}$$

(3.9)

$$f_d = \frac{1}{\sin E + \frac{0.00143}{0.04454 + \tan E}}$$

(3.10)

$$E = 90^\circ - Z$$

yazılabilir (Kahveci ve Yıldız, 2018).

3.3.3. Troposferik gecikme etkisi hesabı için gerekli parametreler ve bu parametrelerin elde edilmesi

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 sondalarından elde edilmektedir.

GNSS gözlemi yapılan noktalarda atmosferik parametrelerin ölçümünde dikkat edilmesi gereken bazı hususlar vardır. Bunlar kullanılan aletin kalibrasyon hataları, yapılan atmosferik ölçülerin noktanın üstündeki sinyal yolunu iyi temsil edememesi gibi durumlardır. Bu gibi durumların etkileri özellikle kısa kenarlı (5-20 km) ağlarda daha da öne çıkmaktadır. Bu ve benzeri hata kaynaklarından kaçınmak için standart atmosfer modelinden yararlanarak hesaplanan verilerin kullanılması GNSS gözlemlerinin değerlendirilmesinde oldukça yaygındır.

Standart atmosfer modelinde genel olarak deniz düzeyindeki referans sıcaklık (T_0), basınç (P_0) ve nem (H_0) değerleri tanımlanmaktadır. Bu değerlerin yüksekliğe bağlı olarak doğrusal bir artış gösterdiği kabul edilerek, gözlem yapılan nokta yüksekliğindeki parametreler hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu değerler zamandan ve gerçek koşullardan bağımsızdır. Söz konusu referans değerler için,

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

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

$$P_0 = 1013.25 \text{ mbar}$$

$$H_0 = \%50$$

değerleri kabul edilmektedir. Böylece h_0 yüksekliğindeki bir nokta için değerler,

$$T_u = T_0 - 0.0065 \cdot h_u \quad (3.11)$$

$$P_u = P_0(1 - 0.0000226 \cdot h_u) \quad (3.12)$$

$$H_u = H_0 \cdot \exp(-0.0006396 \cdot h_u) \quad (3.13)$$

eşitlikleri ile hesaplanmaktadır (Kahveci ve Yıldız, 2018).

3.3.4. Troposferik gecikme etkisini belirlemek için kullanılan modeller ve aralarındaki farklar

Troposferik gecikme etkisini belirlemek için kullanılan modellerden bazıları standart konum belirleme uygulamalarına yönelik, ticari amaçlı değerlendirme yazılımlarında tercih edilen modelleridir. Bunlardan yaygın olarak kullanılan ve en çok bilinenleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

1. Geliştirilmiş Saastamoinen Modeli (1973),
 - i. Duyarlı formüller ile
 - ii. Standart formüller ile
2. Hopfield ve Modified Hopfield Modelleri
3. Chao Modeli

Diğer taraftan, bilimsel amaçlı ve çok yüksek doğruluk isteyen hesaplamalarda, daha geliştirilmiş fonksiyonlar kullanılmaktadır. Bu modeller özellikle düşük yükseklik açılarındaki (<5 derece) hesap yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Bunlardan en bilinenleri,

1. NMF (Niell Mapping Function)
2. VMF (Vienna Mapping Function)
3. GMF (Global Mapping Function)

olarak sayılabilir.

3.3.4.1. Geliştirilmiş Saastamoinen modeli

Saastamoinen standart atmosfer modelinde (3.3.3) nolu başlık altında da bahsedildiği gibi genel olarak referans (deniz düzeyinde) sıcaklık (T_0), basınç (P_0) ve nem (H_0) değerleri tanımlanmaktadır. Buna bağlı olarak h_u yüksekliğindeki bir nokta için değerler (3.11), (3.12) ve (3.13) formüllerine göre hesaplanır. Bunlara ek olarak geleneksel modelin güncel versiyonunda ‘B’ yükseklik düzeltme terimi (Çizelge 3.3.) ile tablo değeri ‘ δL ’ terimi (Çizelge 3.4.) de formüle eklenir.

Çizelge 3.3.: B katsayısı için standart değerler

Deniz seviyesinden olan nokta yüksekliği (km)	Troposferik düzeltme B (mbar)
0	1.156
0.5	1.079
1.0	1.006
1.5	0.938
2.0	0.874
2.5	0.874
3.0	0.813
3.5	0.757
4.0	0.654
5.0	0.563

Çizelge 3.4.: δL düzeltme terimleri (metre)

Görünen Zenit Uzaklığı	Deniz Seviyesinden Orta Nokta Yüksekliği							
	0 km	0,5 km	1 km	1,5 km	2 km	3 km	4 km	5 km
60°00'	+0.003	+0.003	+0.002	+0.002	+0.002	+0.002	+0.003	+0.001
66°00'	+0.006	+0.006	+0.005	+0.005	+0.004	+0.003	+0.006	+0.002
70°00'	+0.012	+0.011	+0.010	+0.009	+0.008	+0.006	+0.012	+0.004
73°00'	+0.020	+0.018	+0.017	+0.015	+0.013	+0.011	+0.020	+0.007
75°00'	+0.031	+0.028	+0.025	+0.023	+0.021	+0.017	+0.031	+0.011
76°00'	+0.039	+0.035	+0.032	+0.029	+0.026	+0.021	+0.017	+0.014
77°00'	+0.050	+0.045	+0.041	+0.037	+0.033	+0.027	+0.022	+0.018
78°00'	+0.065	+0.059	+0.054	+0.049	+0.044	+0.036	+0.030	+0.024
78°30'	+0.075	+0.068	+0.062	+0.056	+0.051	+0.042	+0.034	+0.028
79°00'	+0.087	+0.079	+0.072	+0.065	+0.059	+0.049	+0.040	+0.033

79°30'	+0.102	+0.093	+0.085	+0.077	+0.070	+0.058	+0.047	+0.039
79°45'	+0.111	+0.101	+0.092	+0.083	+0.076	+0.063	+0.052	+0.043
80°00'	+0.121	+0.110	+0.100	+0.091	+0.083	+0.068	+0.056	+0.047

Sonuç olarak, bütün bu parametreler eklenerek Saastamoinen modelinde troposferik etki hesabı aşağıdaki eşitlikteki gibi kullanılmaktadır. (Dach ve ark., 2015).

$$\Delta S_{trop}^Z = \frac{0.002277}{\cos(Z)} \cdot \frac{1}{\cos Z} \left[P + \left(\frac{1255}{273.15+T} + 0.05 \right) \cdot e - B \frac{1}{\tan^2 Z} \right] + \delta L$$

(3.14)

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 basıncı (mbar)

B : noktanın yüksekliğine bağlı hesaplanmış çizelgeden alınacak katsayıyı,

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

$TD=273.15+T$ yazılırsa,

$$e = \frac{H}{100} \cdot \exp(-37.2465 + 0.213166 \cdot TD - 0.000256908 \cdot TD^2) \quad (3.15)$$

elde edilir. (3.15) eşitliğindeki H , nisbi nemi ifade etmektedir.

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

$$\Delta S_{trop}^Z = \frac{\Delta S_d^Z + \Delta S_w^Z}{\cos Z} \quad (3.16)$$

$$\Delta S_d^Z = \frac{0.002277 \cdot P}{1 - 0.00266 \cdot \cos 2\varphi - 0.00028 \cdot h} \quad (3.17)$$

$$\Delta S_w^z = \frac{0.00277 \cdot e \cdot \left(\frac{1255}{TD} + 0.05 \right)}{1 - 0.00266 \cdot \cos 2\varphi - 0.00028 \cdot h} \quad (3.18)$$

yazılabilir (Kahveci ve Yıldız, 2018).

3.3.4.2. Geliştirilmiş Hopfield modeli

Hopfield modeli, meteorolojik verilerin kullanılmasıyla oluşturulan ve bunun yanında hidrostatik denge durumuna dayalı olarak hesaplanan ikinci dereceden bir form modelidir (Hopfield, 1969). Bu model, yerçekimi ivmesini sabit kabul ederek, ıslak ve kuru kırılma değerlerini yüksekliğin dördüncü dereceden bir fonksiyonu olarak modellemektedir. Geliştirilmiş Hopfield modeli aşağıdaki eşitliklerle ifade edilmektedir (Good ve Goodman, 1974; Hopfield, 1969).

$$\Delta S_{trop}^z (metre) = \Delta S_{dry}^z + \Delta S_{wet}^z \quad (3.19)$$

$$\Delta S_{trop}^z = 10^{-6} \cdot N_i \sum_{k=1}^9 \frac{f_{k,i}}{k} \cdot r_i^k \quad (3.20)$$

(3.20) eşitliğindeki ‘‘i’’ indisi sırasıyla kuru ve ıslak bileşenleri ifade etmektedir. Ayrıca, ‘‘f’’ ve ‘‘r’’ ifadeleri ise aşağıda verilmiş olan formüller ile hesaplanmaktadır;

$$r_i = \sqrt{(R_E + h_i)^2 - R_E^2 \cdot \sin^2 z} - R_E \cdot \cos z \quad (3.21)$$

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

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

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

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

$$f_{5,i} = a_i^4 + 12a_i^2 \cdot b_i + 6b_i^2 \quad (3.22)$$

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

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

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

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

(3.22) eşitliklerde bulunan katsayılarda aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır;

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

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

$$h_{dry(metre)} = 40136 + 148.72(T - 273.16)$$

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

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

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

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

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 , yeryuvarının yarıçapını ifade etmektedir.

Geliştirilmiş Hopfield modeli; yüzeyde ölçülen anlık meteorolojik parametreler kullanılarak hesaplanmasının yanında standart yani sabit atmosferik modelden üretilmiş olan parametreler kullanılarak da hesaplanabilmektedir.

3.3.4.3. Niell indirgeme (Niell Mapping Function) modeli

NMF (Niell Mapping Function) modeli diğer hesaplama modellerine göre sahip olduğu yüksek doğruluk nedeniyle ve modelin hesaplama yönteminin kolay olması açısından en çok tercih edilen modellerden biridir. Ayrıca Marini (1972)’de verilen modelin üç katsayılı halini esas almaktadır. Sonuçların elde edilmesi aşamasında anlık atmosferik parametreler kullanılmaz. NMF modelinde girdi olarak sadece zaman ve GNSS alıcısı koordinat bilgilerine ihtiyaç duymaktadır ve yaklaşık bir değer olarak hidrostatik zenit gecikme değeri kullanılmaktadır. Girdi olarak sadece bunların kullanılmasının sebebi ise NMF troposferik gecikme etkisinin global iklim modeline dayanmasıyla alakalıdır (Wolfgang ve ark., 2014)

NMF’de iki farklı eğiklik faktörü mevcuttur. Bunlar kuru ve ıslak bileşen olarak ikiye ayrılmaktadır. NMF uydu sinyalinin 3 derece ve yukarısındaki yükseklik açıları için doğru sonuçlar veren bir model olduğundan tercih edilmektedir. Hidrostatik(kuru) ve ıslak bileşenler için aşağıda eşitlikler verilmektedir (Niell, 1996).

$$M_{dry}(E, H) = m(E, a_d, b_d, c_d) + \Delta m(E, H) \quad (3.23)$$

$$\Delta m(E, H) = \left[\frac{1}{\sin E} - m(E, a_{ht}, b_{ht}, c_{ht}) \right] \cdot H \quad (3.24)$$

$$M_{wet}(E) = m(E, a_w, b_w, c_w) \quad (3.25)$$

Bu eşitliklerde E, sinyal yükseklik açısını ve H ise kilometre biriminde GNSS alıcı anteninin bulunduğu konumun deniz yüzeyinden itibaren 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:

$$\xi(\varphi, t) = \xi_{avg}(\varphi) - \xi_{amp}(\varphi) \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t - T_0}{365.25}\right) \quad (3.26)$$

(3.26) eşitliğindeki “t”, 0.0 Ocak’tan itibaren geçen zamanı ve “ T_0 ” ise yılın gününü (DOY) ifade etmektedir. “ ξ_{avg} ” ve “ ξ_{amp} ” değerleri ise Çizelge 3.5’te verilen değerlerden en yakın iki enlem değeri arasında enterpole yapılarak hesaplanmaktadır. (a_{ht}, b_{ht}, c_{ht}) katsayıları doğrudan Çizelge 3.5’ten alınır, (a_w, b_w, c_w) katsayıları ise yine enlem bağımlı parametreler olup, Çizelge 3.6’dan en yakın iki “ $\xi(\varphi_i)$ ” değeri arasından enterpole ile hesaplanır.

Çizelge 3.5.: Hidrostatik (kuru) bileşen katsayıları (Hydrostatic (dry) component coefficients) (URL-3)

Katsayı	Enlem (φ)				
ξ	15°	30°	45°	60°	75°
Ortalama					
a	1.2769934e-3	1.2683230e-3	1.2465397e-3	1.2196046e-3	1.2045996e-3
b	2.9153695e-3	2.9152299e-3	2.9288445e-3	2.9022565e-3	2.9024912e-3
c	62.610505e-3	62.837393e-3	63.721774e-3	63.824265e-3	64.258455e-3
Genlik					
a	0.0	1.2709626e-5	2.6523662e-5	3.4000452e-5	4.1202191e-5
b	0.0	2.1414979e-5	3.0160779e-5	7.2562722e-5	11.723375e-5
c	0.0	9.0128400e-5	4.3497037e-5	84.795348e-5	170.37206e-5
Yükseklik Düzeltmesi					
a_{ht}	2.53e-5				
b_{ht}	5.49e-3				
c_{ht}	1.14e-3				

Çizelge 3.6.: Islak bileşen katsayıları (Wet component coefficients) (URL-3)

Katsayı	Enlem (ϕ)				
ξ	15°	30°	45°	60°	75°
a_w	5.8021897e-4	5.6794847e-4	5.8118019e-4	5.9727542e-4	6.1641693e-4
b_w	1.4275268e-3	1.5138625e-3	1.4572752e-3	1.5007428e-3	1.7599082e-3
c_w	4.3472961e-2	4.6729510e-2	4.3908931e-2	4.4626982e-2	5.4736038e-2

Çizelge 3.5. ve 3.6.'da 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.

3.3.4.4. Vienna indirgeme (Vienna Mapping Function) modeli

VMF (Vienna Mapping Function) modeli genel itibariyle NMF ile aynı şekilde hesaplama yöntemine sahiptir. İki modeli birbirinden ayıran fark ise VMF'in katsayılarının sayısal hava tahmin (NMW: Numerical Weather Model) modeline dayanmasıdır. VMF modelinde iki tür hesaplama versiyonu bulunmaktadır. Bunlardan biri hassas hesaplama nokta koordinatı ve epok tabanlı (yüksek doğruluklu), diğeri ise hızlı hesap grid(hızlı) yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Böhm ve Schuh, 2003). Hassas hesaplama yönteminde bulunan ıslak ve kuru bileşenlerdeki tüm katsayılar için sinyalin seyrettiği yol boyunca farklı uydu yükseklik açıları adına EKK (En Küçük Kareler) yöntemi ile elde edilmektedir. Yalnız bu çok zaman alıcı bir yöntemdir. Diğer taraftan, pratik uygulamalar için VMF grid (hızlı) yöntemi tercih edilmektedir. Bu yöntemde sadece 3.3° uydu yükseklik açısında gelen sinyal yolu boyunca olan ve (3.27)'deki eşitlikte yer alan katsayılar (a_h , b_h ve c_h) hesaplanmaktadır. Diğer katsayılar ise diğer indirgeme modellerinden deneysel olarak elde edilmektedir. Hızlı versiyon, hassas versiyona göre çok daha hızlı ve pratik bir yöntemdir. Her 6 saatte bir 2.0°x2.5° boylam gridleri şeklinde yayınlanmaktadır. Yayınlananlarda, VMF modeli ile jeodezik ve jeofizik alanı açısından en yüksek şekilde doğrulukların elde edildiği belirtilmektedir (Kouba, 2008; Böhm ve Schuh, 2003; Böhm ve ark., 2006). Hızlı versiyonda ıslak ve kuru (hidrostatik) bileşenler için indirgeme fonksiyonu değerleri (3.27) eşitliği ile hesaplanmaktadır (Marini, 1972).

$$mf(e) = \frac{1 + \frac{a}{b}}{\sin e + \frac{b}{\sin e + c}} \quad (3.27)$$

Kuru(hidrostatik) ve ıslak bileşen hesabında NMF ve VMF modellerinde kullanılan eşitlikler aynıdır. (3.27) eşitliğine bağlı olarak hesaplanan bu modellerde temel ayırım hesaplamada kullanılan girdi parametrelerinin ve a, b ve c katsayılarının elde edilmesi kısmıdır. Bu farklılıklar özetle Çizelge 3.7.'de açıklanmıştır.

Çizelge 3.7. NMF ve VMF modelleri arasındaki farklar (Differences between NMF and VMF models)

Hesaplanan Büyüklük	NMF Girdi Parametreleri	VMF Girdi Parametreleri
Kuru (Hidrostatik) Bileşen	DOY (yılın günü) Deniz seviyesinden itibaren istasyon yüksekliği Jeodezik enlem	Deniz seviyesinden itibaren istasyon yüksekliği a, b ve c katsayıları
Islak Bileşen	Jeodezik enlem	a, b ve c katsayıları
(a, b, c) katsayıları belirlenme yöntemi	Çizelge 3.5 ve 3.6'dan enterpole ile hesaplanır	Hesap yılı ve yılın günü için https://vmf.geo.tuwien.ac.at/trop_products bağlantı adresinden elde edilir.

3.3.4.5. Global indirgeme (Global Mapping Function) modeli

GMF (Global Mapping Function) modeli bu tezin konusu olmamakla birlikte, son yıllarda özellikle GNSS hesaplamalarında sıkça tercih edilen bir hesaplama yöntemi olarak karşımıza çıkmakta olduğu için temel olarak açıklanmıştır. GMF modeli, harici veri kaynağına dayanan ve VMF modelinin bir yedeği olarak düşünülmektedir (Böhm ve ark.,2006). Herhangi mücbir sebeplerden ötürü VMF hesaplamada kullanılan verilerine erişilemediği durumlarda, GMF modeli devreye girmektedir. VMF ile uyumlu sonuçlar elde edilmektedir. Gerçekte, GMF katsayıları VMF modelinden türetilmekte ve küresel harmoniklere açılmış global grid üzerinde gösterilmektedir.

4. TROPOSFERİK GECİKME ETKİSİ HESABI YAZILIMI

Troposferik etki hesabı yazılımına ait kodlamalar ve scriptler, “MathWorks” firması tarafından geliştirilen “MATLAB R2020a” platformunda hazırlanmıştır. Yazılıma ait Grafiksel Kullanıcı Arayüzü (Graphical User Interface, GUI) olarak ise yine MATLAB’a ait App Designer platformu kullanılarak kullanıcı dostu bir arayüz tasarlanmıştır (URL-5).

Bu yazılımda istenilen troposferik gecikme etkisinin hesaplandığı modellerden seçimler yapılarak, seçilen modele göre aktifleşecek olan yardımcı menüler yardımıyla sonuçlar elde edilmektedir. Diğer bir ifade ile kullanıcı, arayüz de bulunan troposferik modellerden (Chao, Hopfield, Niell, Saastomonien, VMF_Hizli, VMF_Hassas) birini, birkaçını ya da tamamını seçebilir. Sonrasında modellerden sonuç elde edebilmek için kullanılan parametrelerin girildiği kısımlara (meteorolojik veriler, parametreler, tarih) ilgili veriler girilir ve son olarak “HESAPLA” butonu ile hesaplamalar gerçekleştirebilmektedir. Diğer taraftan “SONUCLARI TEMİZLE” butonu ile sonuç çıktıları temizlenebilmektedir.

Yazılım, bazı modellerde çevrimiçi, bazı modellerde ise çevrimdışı olarak çalışmaktadır. Başka bir deyişle Chao, Hopfield, Niell ve Saastomonien hesap modelleri, internete bağlı olmadan çevrimdışı olarak çalışabilirken, VMF_Hizli ve VMF_Hassas hesap modelleri ise internete bağlı olarak yani çevrimiçi çalışabilmektedir.

Oluşturulan bu yazılımın esas amacı, farklı modeller ile elde edilmiş olan troposferik gecikme etkisinin sonuçlarını görmek ve bu sonuçlar arasında karşılaştırma yaparak GNSS ölçü ve hesaplamalarında troposferik gecikme etkisine dair en uygun sonucu veren modeli kullanıcılara öneri olarak sunabilmektir. Diğer taraftan, oluşturan arayüz ile de farklı troposferik gecikme modelleri derli toplu olacak şekilde bir araya getirip, seçilen modele göre kullanılması gereken meteorolojik verileri ya da parametreleri açık bir biçimde kullanıcıya gösteren, ayrıca elde edilen sonuçlara göre de modeller arasındaki farklılıkları düzenli bir şekilde kullanıcıya sunabilmeyi hedeflemektedir.

Söz konusu yazılıma ait ana ekran görüntüsü, örnek hesaplama ekran görüntüsü, bilgi mesajı ekran görüntüsü ve sonuç ekranı görüntüsü Şekil (4.1-4.2.-4.3.-4.4.)’de verilmiştir.

TROPOSFERİK ETKİ HESABI MODELLERİ

Troposferik Modeller

☐ Chao ☐ Hopfield ☐ Saastomonien ☐ Niell ☐ VMF_Hızlı ☐ VMF_Hassas

Meteorolojik Veriler

Sıcaklık
 Basınç
 Nem

Parametreler

Zenit
 Yükseklik
 Enlem
 Boylam

Tarih

Yıl
 Ay
 Gün
 Saat

Sonucilar

Chao metre
 Hopfield metre
 Saastomonien-1 metre
 Saastomonien-2 metre
 Niell metre
 VMF_Hızlı metre
 VMF_Hassas metre

SONUÇLARI TEMİZLE HESAPLA

HARİTA ÜZERİNDE HESAPLA

Şekil 4.1. Troposferik etki hesabı yazılımına ait ekran görüntüsü

TROPOSFERİK ETKİ HESABI MODELLERİ

Troposferik Modeller

☒ Chao ☒ Hopfield ☒ Saastomonien ☒ Niell ☒ VMF_Hızlı ☒ VMF_Hassas

Meteorolojik Veriler

Sıcaklık
 Basınç
 Nem

Parametreler

Zenit
 Yükseklik
 Enlem
 Boylam

Tarih

Yıl
 Ay
 Gün
 Saat

Sonucilar

Saastomonien-1 metre
 Saastomonien-2 metre
 Niell metre
 VMF_Hızlı metre
 VMF_Hassas metre

SONUÇLARI TEMİZLE HESAPLA

HARİTA ÜZERİNDE HESAPLA

Hesaplanıyor

Saastomonien Modeli Hesaplanıyor...

Şekil 4.2. Troposferik etki hesabı yazılımına ait örnek hesaplama ekran görüntüsü

TROPOSFERİK ETKİ HESABI MODELLERİ

Troposferik Modeller

☒ Chao ☒ Hopfield ☒ Saastomonien ☒ Niell ☒ VMF_Hızlı ☒ VMF_Hassas

Meteorolojik Veriler

Sıcaklık
 Basınç
 Nem

Parametreler

Zenit
 Yükseklik
 Enlem
 Boylam

Tarih

Yıl
 Ay
 Gün
 Saat

Hesaplama Tamamlandı

Saastomonien-1 metre
 Saastomonien-2 metre
 Niell metre
 VMF_Hızlı metre
 VMF_Hassas metre

SONUÇLARI TEMİZLE HESAPLA

HARİTA ÜZERİNDE HESAPLA

Şekil 4.3. Troposferik etki hesabı yazılımına ait bilgi mesajı ekran görüntüsü

TROPOSFERİK ETKİ HESABI MODELLERİ

Troposferik Modeller

☒ Chao ☒ Hopfield ☒ Saastomonien ☒ Niell ☒ VMF_Hızlı ☒ VMF_Hassas

Meteorolojik Veriler

Sıcaklık
 Basınç
 Nem

Parametreler

Zenit
 Yükseklik
 Enlem
 Boylam

Tarih

Yıl
 Ay
 Gün
 Saat

Sonuçlar

Chao metre
 Hopfield metre
 Saastomonien-1 metre
 Saastomonien-2 metre
 Niell metre
 VMF_Hızlı metre
 VMF_Hassas metre

SONUÇLARI TEMİZLE HESAPLA

HARİTA ÜZERİNDE HESAPLA

Şekil 4.4. Troposferik etki hesabı yazılımına ait örnek sonuç ekran görüntüsü

Yapılan diğ er bir uygulama ise yine ‘‘MATLAB R2020a’’ platformunda hazırlanmıştır. Bu uygulamada altlık olarak enlem ve boylam değerleri bulunan topoğrafik Türkiye haritası yazılıma entegre edilmiştir. Kullanıcı, arayüzde dilediği bir troposferik modeli seçip ilgili girdi değerlerini girmek suretiyle ‘‘HARİTA ÜZERİNDE HESAPLA’’ butonuna tıkladıktan sonra topoğrafik Türkiye haritası üzerinde de troposferik gecikme etkisine ait hesap sonuçlarını görebilmektedir. Buradan hareketle, kullanıcı açılan Türkiye haritasında faresi ile herhangi bir noktaya gelerek hesaplamak istediği noktayı tıklama yöntemiyle (mause click) troposferik modellere ait sonuç değerlerini ekranda görebilmektedir. Söz konusu uygulama için ekran görüntüleri şekiller (4.4-4.6) gibidir.

TROPOSFERİK ETKİ HESABI MODELLERİ

Troposferik Modeller

☒ Chao ☒ Hopfield ☒ Saastomonien ☒ Niell ☒ VMF_Hızlı ☒ VMF_Hassas

Meteorolojik Veriler

Sıcaklık: 18
 Basınç: 1013
 Nem: 50

Parametreler

Zenit: 80
 Yükseklik: 1000
 Enlem: 45
 Boylam: 50

Tarih

Yıl: 2020
 Ay: 7
 Gün: 17
 Saat: 12

Sonuçlar

Chao: [] metre
 Hopfield: [] metre
 Saastomonien-1: [] metre
 Saastomonien-2: [] metre
 Niell: [] metre
 VMF_Hızlı: [] metre
 VMF_Hassas: [] metre

SONUÇLARI TEMİZLE HESAPLA

HARİTA ÜZERİNDE HESAPLA

şekil 4.4. Troposfer-harita uygulaması için ana menü



Şekil 4.5. “HARİTA ÜZERİNDE HESAPLA” butonuna tıklayınca açılan menü



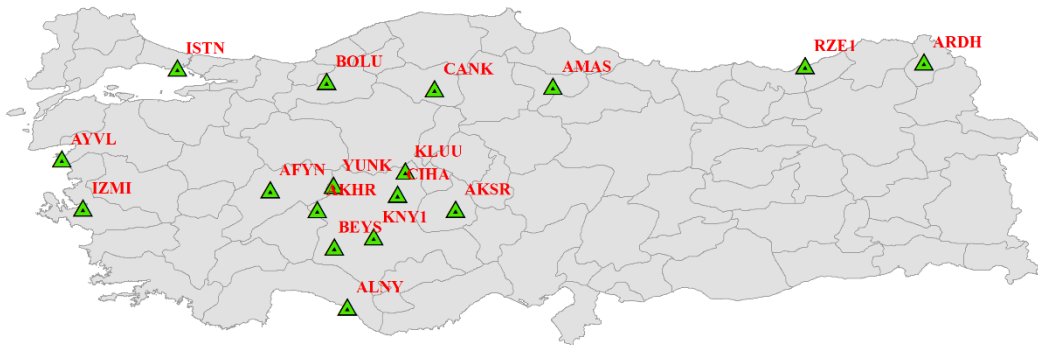
Şekil 4.6. Harita üzerinde herhangi bir noktaya tıklanınca açılan menü

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması kapsamında hazırlanan sayısal uygulamada 17 adet TUSAGA-Aktif istasyonuna ait veri setleri kullanılmıştır. Bu istasyonlara ait koordinat bilgileri Çizelge 5.1’de, istasyonların konumları ise Şekil 5.1.’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. TUSAGA-Aktif istasyonları koordinat bilgileri

Nokta	Elipsoidal Koordinatlar (Enlem, Boyam, Elipsoit yüksekliği)		
	φ (° ' ")	λ (° ' ")	h (m)
BEYS	37 40 38.283585	31 44 47.581601	1187.4602
CIHA	38 39 01.392358	32 55 20.660456	1012.7128
KLUU	39 04 44.767989	33 03 55.308533	1052.3153
YUNK	38 49 13.675673	31 43 34.594014	1192.0592
KNY1	37 51 33.839320	32 28 34.873960	1084.4099
AKHR	38 22 09.378172	31 25 47.071925	1046.3983
AFYN	38 44 18.102523	30 33 39.611755	1072.276
AKSR	38 22 13.403468	33 59 53.337054	1005.7896
ALNY	36 33 19.964063	31 59 18.759011	62.8486
AMAS	40 39 56.486391	35 50 57.460977	443.6131
ARDH	41 06 40.538239	42 41 56.622128	1834.0687
AYVL	39 18 41.192864	26 41 10.240252	54.2555
BOLU	40 44 00.742584	31 36 07.317668	789.2424
CANK	40 36 30.872662	33 36 37.369340	794.9424
ISTN	40 59 27.462292	28 49 53.882694	77.0522
IZMI	38 23 41.307468	27 04 54.559292	74.9336
RZE1	41 02 12.825296	40 29 35.131378	70.699



Şekil 5.1. Sayısal uygulama kapsamında seçilen TUSAGA-Aktif istasyonları

MATLAB tabanlı yazılım kullanılarak önceki başlıklarda anlatılmış olan tüm modellere ait hesaplamalar yapılmış ve sonuçlar Çizelge 5.2., 5.3. ve 5.4.'de sunulmuştur.

Hesaplamalar, bu yazılımın hazırlanarak test çalışmalarının yapılmaya başlandığı 10 Şubat 2020 tarihine göre yapılmıştır. Yazılım içinde yer alan modellerden Saastamoinen, Hopfield ve Niell'de her gün için tek bir değer hesaplanabilmekte, VMF modelinde ise zamana bağlı olarak hesap yapılabilmektedir. Aşağıda verilecek olan çizelgelerde bu durumun göz önünde bulundurulması gereklidir. Bunlara ek olarak, çizelgelerdeki sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, troposferik etki uydu-alıcı sinyal yükseklik açısına bağlı olarak değişim göstermektedir. Başka bir ifadeyle, uydu sinyal yükseklik açısı ile troposferik etki arasında ters orantı mevcut olup, yükseklik açısı büyüdükçe ve gözlemcinin zenitine yaklaştıkça bu etki azalacaktır. Bu durum, tezin konusu olan TUSAGA-Aktif noktalarında da 5, 10 ve 15 derecelik uydu yükseklik açılarında sonuçlar elde edilerek çizelgelere işlenmiştir. Çizelgelerden sonra sonuçların daha iyi görülebilmesi amaçlı oluşturulan grafikler şekillerle verilmiştir.

Çizelge 5.2. 10 Şubat 2020 için troposferik gecikme değerleri (Sinyal Yükseklik Açısı 5°)

Nokta Adı	Hesap günü/saati	Troposferik Etki (metre) (Sinyal yükseklik açısı=5 derece)					
		Saastamoinen (Eşitlik 3.14)	Saastamoinen (Eşitlik 3.16)	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
AFYN	12:00	20.2764	33.8631	21.1132	20.9335	21,0716	21,0663
	03:00					21,1234	21,0594
AKSR	12:00	20.4618	33.2876	21.3020	20.9307	21,0702	21,0201
	03:00					21,1220	21,1071
ALNY	12:00	23.4790	27.9043	24.3362	20.8953	21,0496	21,0345
	03:00					21,1015	21,0740
AMAS	12:00	22.1537	29.5483	23.0183	20.9132	21,0576	20,9672
	03:00					31,1095	21,0362
ARDH	12:00	18.3366	44.0079	19.1051	20.9631	21,0881	21,0606
	03:00					21,1400	21,1544

AYVL	12:00	23.5112	27.8663	24.3678	20.8979	21.0492	20.9871
	03:00					21.1010	21.0200
BOLU	12:00	21.0814	31.6204	21.9362	20.9256	21.0652	21.0266
	03:00					21.1170	21.0583
CANK	12:00	21.0647	31.6605	21.9191	20.9256	21.0653	20.9750
	03:00					21.1172	21.0440
ISTN	12:00	23.4261	27.9446	24.2843	20.9005	21.0495	20.9812
	03:00					21.1014	20.9714
IZMI	12:00	23.4340	27.9436	24.2920	20.8977	21.0497	20.9366
	03:00					21.1016	20.9866
RZE1	12:00	23.4498	27.9212	24.3075	20.9003	21.0494	21.0402
	03:00					21.1012	21.0213

Çizelge 5.3. 10 Şubat 2020 için troposferik gecikme değerleri (Sinyal Yükseklik Açısı 10°)

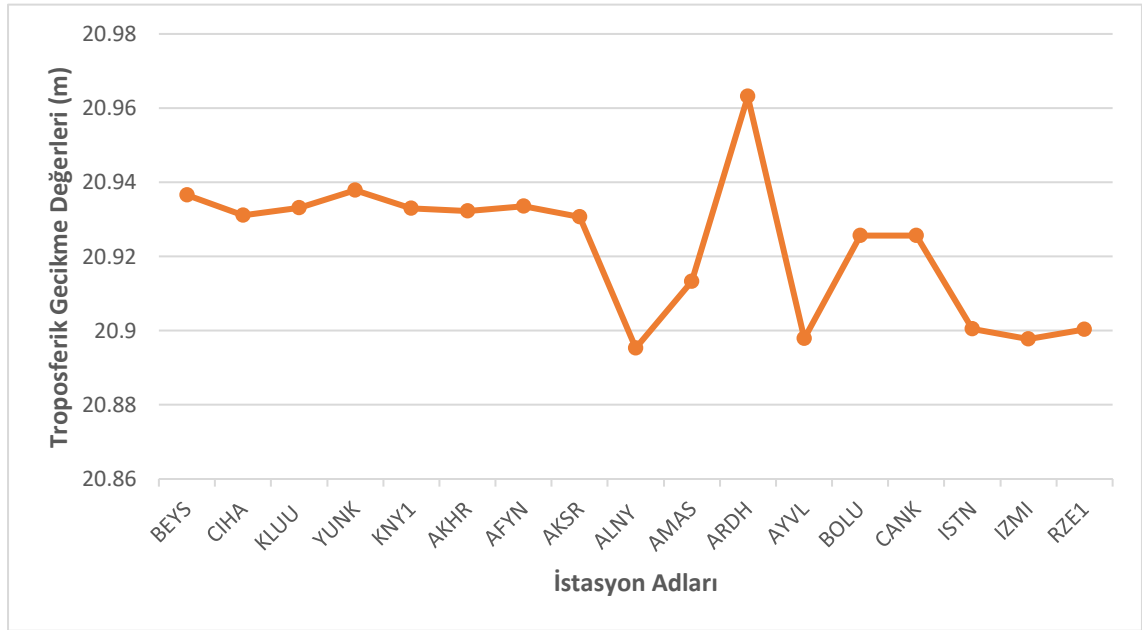
Nokta Adı	Hesap günü/saati	Troposferik Etki (metre) (Sinyal yükseklik açısı=10 derece)					
		Saastamoinen (Eşitlik 3.14)	Saastamoinen (Eşitlik 3.16)	Hopfield	Niell	VMF (Epok)	VMF (Grid)
BEYS	12:00	11.2856	15.8490	11.3066	11.2166	11,2391	11,2336
	03:00					11,2467	11,2395
CIHA	12:00	11.5571	16.4944	11.5746	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
AFYN	12:00	11.4634	16.9962	11.4822	11.2163	11,2387	11,2347
	03:00					11,2463	11,2338
AKSR	12:00	11.5681	16.7074	11.5854	11.2159	11,2384	11,2283
	03:00					11,2460	11,2411
ALNY	12:00	13.2647	14.0054	13.2376	11.2112	11,2347	11,2293
	03:00					11,2423	11,2352
AMAS	12:00	12.5238	14.8306	12.5215	11.2139	11,2362	11,2203
	03:00					11,2438	11,2305
ARDH	12:00	10.3594	22.0880	10.3833	11.2203	11,2417	11,2353
	03:00					11,2493	11,2489
AYVL	12:00	13.2825	13.9864	13.2547	11.2118	11,2347	11,2222
	03:00					11,2423	11,2271
BOLU	12:00	11.9198	15.8706	11.9317	11.2154	11,2376	11,2291
	03:00					11,2452	11,2338
CANK	12:00	11.9103	15.8907	11.9223	11.2154	11,2376	11,2217
	03:00					11,2452	11,2319
ISTN	12:00	13.2353	14.0257	13.2094	11.2123	11,2347	11,2218
	03:00					11,2424	11,2205
IZMI	12:00	13.2397	14.0252	13.2136	11.2117	11,2347	11,2150
	03:00					11,2424	11,2224
RZE1	12:00	13.2484	14.0139	13.2220	11.2122	11,2347	11,2309
	03:00					11,2423	11,2282

Çizelge 5.4. 10 Şubat 2020 için troposferik gecikme değerleri (Sinyal Yükseklik Açısı 15°)

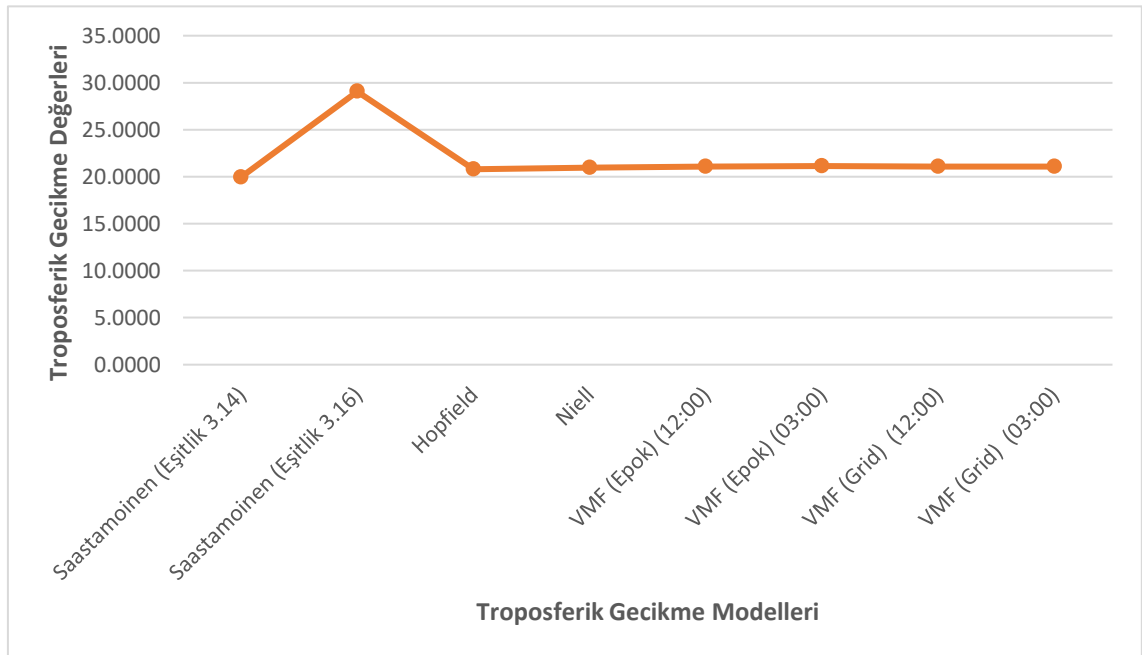
Nokta Adı	Hesap günü/saati	Troposferik Etki (metre) (Sinyal yükseklik açısı=15 derece)					
		Saastamoinen (Eşitlik 3.14)	Saastamoinen (Eşitlik 3.16)	Hopfield	Niell	VMF (Epok)	VMF (Grid)
BEYS	12:00	7.7291	10.7909	7.7229	7.6358	7,6428	7,6398
	03:00					7,6451	7,6416
CIHA	12:00	7.9151	11.2278	7.9062	7.6356	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
AFYN	12:00	7.8509	11.4032	7.8430	7.6357	7,6427	7,6401
	03:00					7,6450	7,6398
AKSR	12:00	7.9226	11.2094	7.9136	7.6356	7,6426	7,6382
	03:00					7,6449	7,6420
ALNY	12:00	9.0835	9.3966	9.0429	7.6342	7,6414	7,6384
	03:00					7,6437	7,6402
AMAS	12:00	8.5770	9.9502	8.5537	7.6350	7,6419	7,6357
	03:00					7,6442	7,6388
ARDH	12:00	7.0940	14.8194	7.0911	7.6369	7,6436	7,6404
	03:00					7,6459	7,6445
AYVL	12:00	9.0957	9.3838	9.0546	7.6344	7,6414	7,6362
	03:00					7,6437	7,6377
BOLU	12:00	8.1636	10.6480	8.1504	7.6355	7,6423	7,6384
	03:00					7,6446	7,6398
CANK	12:00	8.1571	10.6615	8.1441	7.6355	7,6423	7,6362
	03:00					7,6446	7,6393
ISTN	12:00	9.0635	9.4102	9.0236	7.6346	7,6414	7,6361
	03:00					7,6437	7,6358
IZMI	12:00	9.0664	9.4098	9.0265	7.6344	7,6414	7,6341
	03:00					7,6437	7,6363
RZE1	12:00	9.0724	9.4023	9.0322	7.6346	7,6414	7,6389
	03:00					7,6437	7,6381

Şekil 5.2. 'de tek modelde ve 5°'lik yükseklik açısında bütün istasyonlarda elde edilen sonuçların grafik üzerinde gösterimi sağlanmıştır. Şekil 5.3.'de tek bir istasyona ait 5°'lik yükseklik açısında tüm modellerden elde edilen değerlerin grafik gösterimi yapılmıştır. Son olarak Şekil 5.4.'de tek bir model çerçevesinde 5°,10° ve 15°'lik yükseklik açılarında elde edilen sonuçlar bir araya getirilip grafik gösterimi yapılmıştır. Grafiklerde troposferik gecikme modeli olarak NMF (Niell Mapping Function) kullanılmasının nedenleri ise son yıllarda yapılmış ve yapılmakta olan bilimsel çalışmalarda en çok tercih edilen ve yeni geliştirilmiş diğer tüm modellerin (VMF, GMF vb.) temel teorisini oluşturmasıdır. Yukarıda ifade edilmiş olan gerekçeler

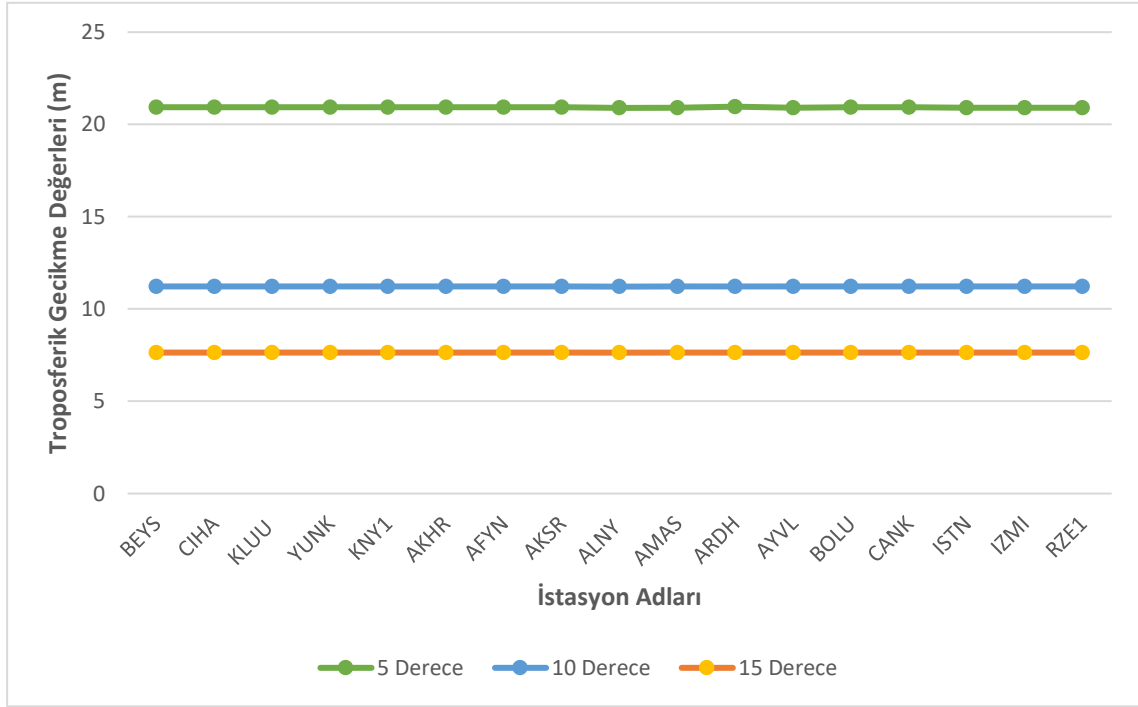
nedeniyle bu tez çalışmasında Niell modeli referans (doğru) model olarak kabul edilmiş ve tüm diğer model sonuçlarının karşılaştırması Niell modeline göre yapılmıştır. Dolayısıyla, sonuç grafiklerde bu modele ait sonuçlar kullanılmıştır.



Şekil 5.2. 5° yükseklik açısında NMF (Niell Mapping Function) modelinin 17 istasyona bağlı sonuç grafiği



Şekil 5.3. 5° yükseklik açısında BEYS istasyona bağlı tüm modellerin sonuç grafiği



Şekil 5.4. NMF (Niell Mapping Function) modelinin 5°, 10° ve 15° yükseklik açılarındaki elde edilen değerlere ait sonuç grafiği

Yukarıda da belirtilmiş olduğu üzere hesaplamalar 5°, 10° ve 15° sinyal yükseklik açılarına bağlı olarak hesaplanmış ve troposferik etkinin uydu-alıcı sinyal yoluna bağlı olarak değişimlerini göstermek amaçlanmıştır. Bu konuda İsviçre Bern Üniversitesinde yapılan bir çalışmada elde edilmiş sonuçlara göre, deniz seviyesindeki standart atmosferik koşullar için farklı yükseklik açılarındaki troposferik etki ıslak ve kuru bileşen büyüklükleri Çizelge 5.5.'de verilmektedir (Dach ve ark., 2015).

Çizelge 5.5. 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

Çizelge 5.5.'de görüleceği üzere alıcıya gelen GPS sinyalinin zenit açısı ne kadar büyükse, bu sinyal atmosferde zenit doğrultusuna göre daha uzun bir yol izleyeceğinden, ΔS_d ve ΔS_w değerleri de doğru orantılı olarak artacaktır. Buradaki artış miktarı yaklaşık olarak $1/\cos Z$ kadardır. Bu genel kabul görmüş değerlerin Türkiye'deki herhangi bir ölçü noktası için (bu tez kapsamında BEYS noktası

alınmıştır) geçerli olup olmadığı da araştırılmış olup, en bilinen iki model olan Saastamoinen ve Niell modelleri ile hesaplanarak sonuçlar Çizelge 5.6.'da verilmiştir. Çizelge 5.6.'dan da görüleceği gibi elde edilen sonuçlar Çizelge 5.5.'deki genel kabul görmüş sonuçlarla uyumludur.

Çizelge 5.6. 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

Daha önce de ifade edilmiş olduğu gibi, yukarıda verilen çizelgelerin yorumlanması amacıyla referans olarak Niell modelinin sonuçları doğru olarak kabul edilmiş ve diğer bütün modellerin sonuçları ile karşılaştırılarak yorum yapılmıştır. Niell modelinden elde edilen sonuçların doğru kabul görülmesinin sebebi ise; modern troposferik modellerin temelini oluşturan teoriye sahip olması ve günümüzde yüksek doğruluk isteyen ve en önemlisi düşük yükseklik açılarında yüksek doğruluklu sonuçların elde edilmesini sağlayan model olarak tüm bilimsel ve yüksek duyarlılık isteyen çalışmalarda temel olarak kullanılmaktadır (Dach ve ark,2015; Herring ve ark.,2018).

Modellerden elde edilen sonuçları karşılaştırıldığında; Niell modeline ait sonuçlar referans olarak kabul edildiğinde, bu model ile aynı çözüm stratejisine sahip olan VMF'e ait sonuçlar uyumlu bir şekilde elde edilmektedir.

Saastamoinen (1972) ve Hopfield modelleriyle elde edilen sonuçlarda birbirlerine yakın değerlerdedir ki bu da aslında ikisinin aynı dönemlerde ortaya çıktığını, yapılmak istenen çalışmalarda kullanılacak sonuçların doğruluk seviyesinin yeterli miktarda olduğunu göstermektedir. Bu durumdan yola çıkılarak, bu iki modelden elde edilecek olan sonuçlar, çok yüksek doğruluk istemeyen ve pratik çözüm gerektiren çalışmalar adına kullanılmaktadır.

Çizelgelerdeki sonuçlardan da anlaşılacağı üzere, Saastamoinen modeli için iki farklı yöntem tercih edilmiştir. Birisi (3.14) eşitliğinde verilmiş olan, yükseklik düzeltilmesine bağlı olarak ve güvenilir sonuç elde edilen bir yöntemdir. Diğeri ise (3.16) da ki sonuç eşitliği olan (3.17) ve (3.18) eşitlikleri ile hesaplanan, enleme bağlı olarak

yüksek doğruluktan ziyade pratik çözüm amaçlayan uygulamalar adına kullanılan bir yöntemdir. Bu nedenle her iki yöntemle de elde edilmiş olan sonuçlarda ciddi farklar mevcuttur. Ancak bu durum çizelgeler incelendiğinde de anlaşılacağı üzere, yükseklik açısı ile ters orantılı olup, açı büyüdükçe fark azalmıştır.

Yukarıdaki tüm çizelgeler incelendiğinde yükseklik açılarına göre yapılmış olan karşılaştırmalar sonucunda dikkat çeken kısım uydu-alıcı sinyalinin yükseklik açısının ne kadar önemli olduğudur. Çizelgelerden de anlaşılacağı üzere yükseklik açısı gözlemcinin zenitine (90°) yaklaştıkça troposferik etki önemli derecede düşecektir. Ancak bu çıkarım, tüm GNSS ölçülerinin 90° 'ye yakın uydu verileri ile yapılması gerektiği anlamına gelmemelidir. Çünkü; ölçü anında yeterli sayıda uyduya gözlem yapılabilme sorunu, uydu geometrisi ve söz konusu yükseklik açılarında diğer bozucu etkilerin büyüklükleri ve bunların giderilebilmesindeki zorluklar ve farklı yöntemler gibi nedenlerle GNSS ölçülerinin, amaca uygun olarak, 0 derece ile 10 derece arasındaki yükseklik açılarında yapılması genel kabul gören bir uygulamadır. Diğer bir deyişle, GNSS ile konum belirleme çalışmasında temel düşünce; gökyüzünde olabildiğince çok uyduya gözlem yapılarak veri toplamak ve bu veriler içinde kullanıma en uygun olanların konum hesabında kullanılmasını sağlamaktır. Bu nedenle, her bozucu etki için farklı çözüm yöntemleri uygulanmaktadır. Sonuç olarak; günümüzde yüksek doğruluk isteyen GNSS uygulamalarında ölçüler yükseklik açısı sıfır derece seçilerek (izlenebilen tüm uydular için) yapılmakta, hesaplamalar ise (amaca uygun olarak) yükseklik açısı 2 ile 10 derece arasındaki bir değer seçilerek yapılmaktadır. Örneğin, troposferik etki nokta yüksekliğinin doğruluğunu etkilemekte, böyle bir durumda uydu yükseklik açısının büyük seçilmesi nokta yüksekliğinin daha düşük doğrulukla elde edilmesine neden olacaktır.

Türkiye coğrafyasında troposferik etkinin model bağımlı olarak farklılığını ortaya koymak için Saastamoinen, NMF ve VMF modelleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu amaçla, 7.5x7.5 dakika (1:25,000 ölçekli paftalar) aralıklı gridlere sahip Türkiye haritası üzerindeki grid köşelerinde trposferik etki değerleri hesaplatılmış olup, sonuçlar Şekil 5.5.-5.6. ve 5.7.'da görülmektedir. Elde edilen sonuçlar bu haritalar üzerinde renk kademeleriyle gösterilmiştir. Çizelge 5.7'de ise haritalarda kullanılan modeller ve sabit alınan katsayılar verilmiştir.

Çizelge 5.7. Haritalarda kullanılan modeller ve sabit alınan katsayılar

Parametreler	Troposferik Modeller		
	Saastamoinen	NMF	VMF
Epok	17/07/2020 UTC: 12:00	17/07/2020 UTC: 12:00	17/07/2020 UTC: 12:00
Yükseklik	Gerekli yükseklik bilgisi (http://icgem.gfz-potsdam.de/calgrid) adresinden alınmıştır.		
Sıcaklık	18 °C	-	-
Basınç	1013.25 mbar	-	-
Nem	50 g/m ³	-	-
Yükseklik Açısı	10 Derece	10 Derece	10 Derece

Söz konusu şekiller incelendiğinde aşağıdaki yorumları yapmak olanaklıdır:

a. Saastamoinen, NMF ve VMF modelleri ile hesaplanmış olan Troposferik etki büyüklükleri incelendiğinde VMF ve NMF modellerinin yaklaşık benzer sonuçlar verdiği, Saastamoinen modelinin ise bunlara göre farklı sonuçlar verdiği görülmektedir. Bu farklılıkların, tez içerisinde bu modellere ilişkin anlatılmış olan hesaplama yöntemi (kullanılan girdi verileri ve matematik model) farklılıklarından kaynaklandığı açıktır.

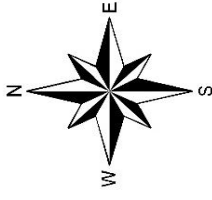
b. Bu haritalar hazırlanırken troposferik etki değerleri her bir haritanın sağ tarafındaki renk kademelerinden de görüleceği gibi noktadan sonra 4 basamak alınmıştır. Oysa, troposferik etki hesaplamaları için noktadan sonra iki haneli sonuçları kullanmak yeterli olup, eğer bu şekilde NMF ve VMF modelleri ile haritalar çizdirilecek olursa örnek olarak hazırlanmış bu iki haritanın her birisinin kendi içinde tek renk olacağı açıktır. Bunun nedeni ise; Çizelge 5.7’de verilen bir epok için geçerli parametrelere göre hesaplama yapılmış olmasıdır. Diğer bir ifadeyle, tüm Türkiye için kullanılmak üzere troposferik etki haritalarının hazırlanması için gerçek koşullara ait atmosferik değerlere, zamana (günlük, mevsimlik) ve uydu sinyali zenit açısına bağlı parametrelere göre hesaplamalar yapılması en uygun yöntem olmaktadır. Böyle yapıldığı takdirde troposferik etkinin zamana ve konuma göre değişimi çok daha belirgin olarak görülecektir.

c. Bu haritalardan çıkarılacak bir başka sonuç ise; GNSS ile hesaplamalarda hangi troposferik modelin kullanıldığı çok önemlidir. Söz konusu haritalara bakıldığında NMF/VMF modeli ile Saastamoinen modeli arasında 2-4 metre

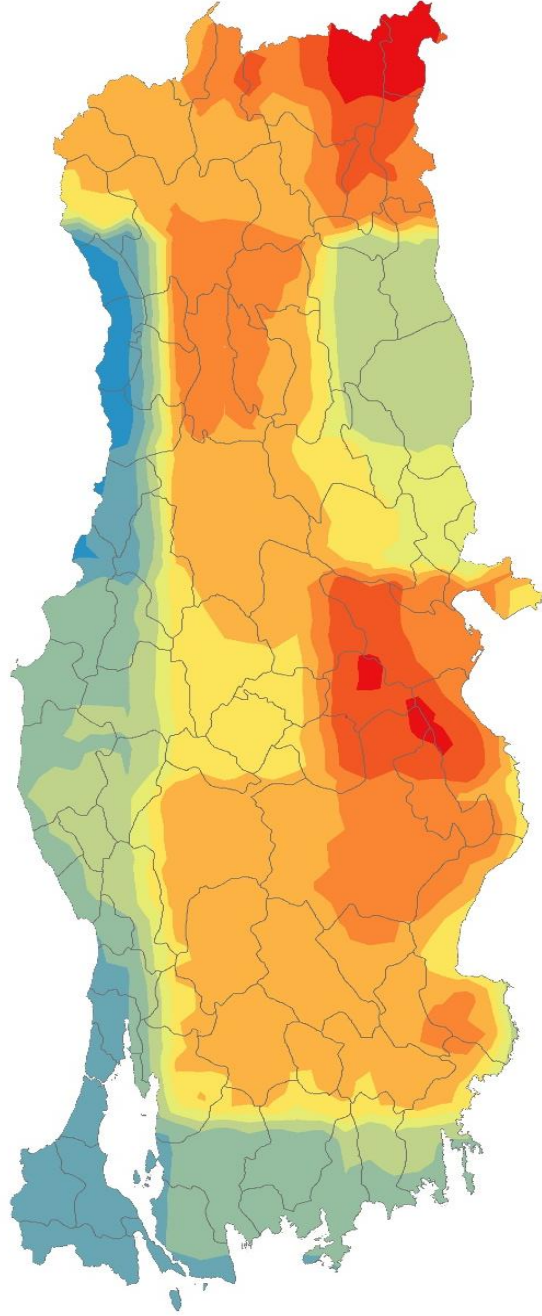
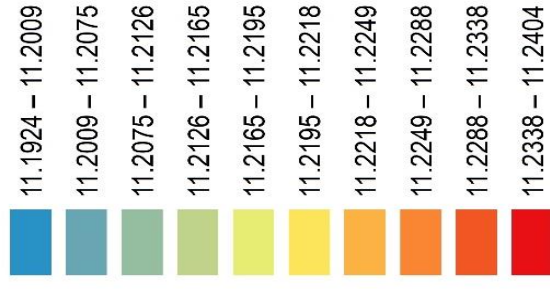
dolaylarında farklar elde edilmiştir. Bu seviyedeki farklar, konum hesaplamalarında troposferik etki özellikle nokta yüksekliklerini doğrudan etkilediği için önemlidir.

d. Günümüzde bilimsel amaçlı çalışmalarda NMF ve VMF (GMF) modellerinin kullanıldığı dikkate alınır, her çalışma bölgesi için veya ülke boyutunda yeteri sayıda noktada ölçü yapılarak mevsimsel troposferik etki haritalarının hazırlanması olanaklıdır. Daha pratik bir yöntem olarak ise; troposferik etkinin yavaş da olsa sürekli değişim gösterdiği ve özellikle gerçek zamanlı GNSS kullanıcılarının daha doğru koordinat belirleyebilmesi için güncel bilgi sağlanması amaçlandığı durumlarda, TUSAGA-Aktif ağı için NMF veya VMF modellerinden tercih edilecek birisi kullanılarak tüm Türkiye için söz konusu haritaların yayımlanması çok yararlı olacaktır.

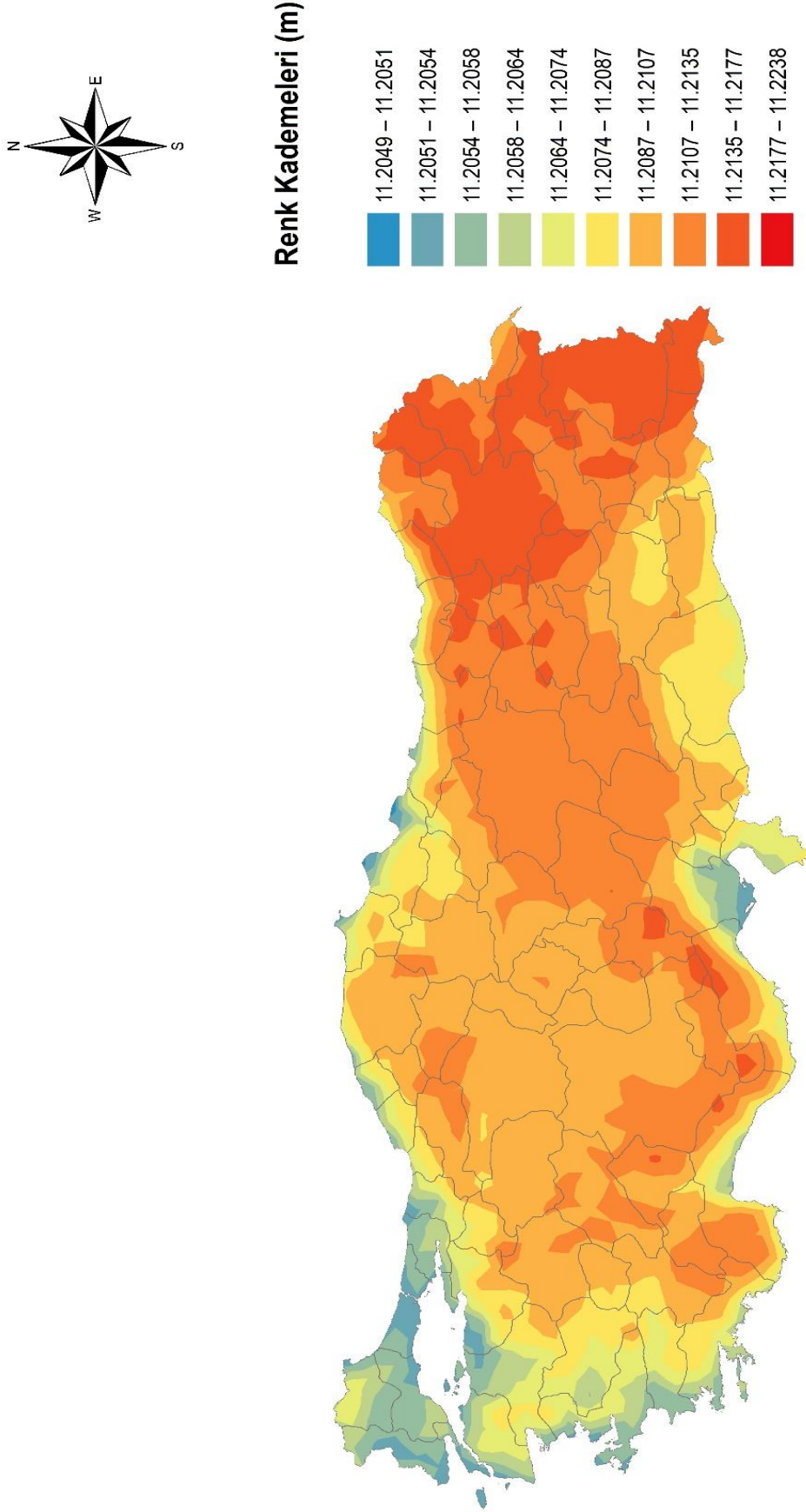




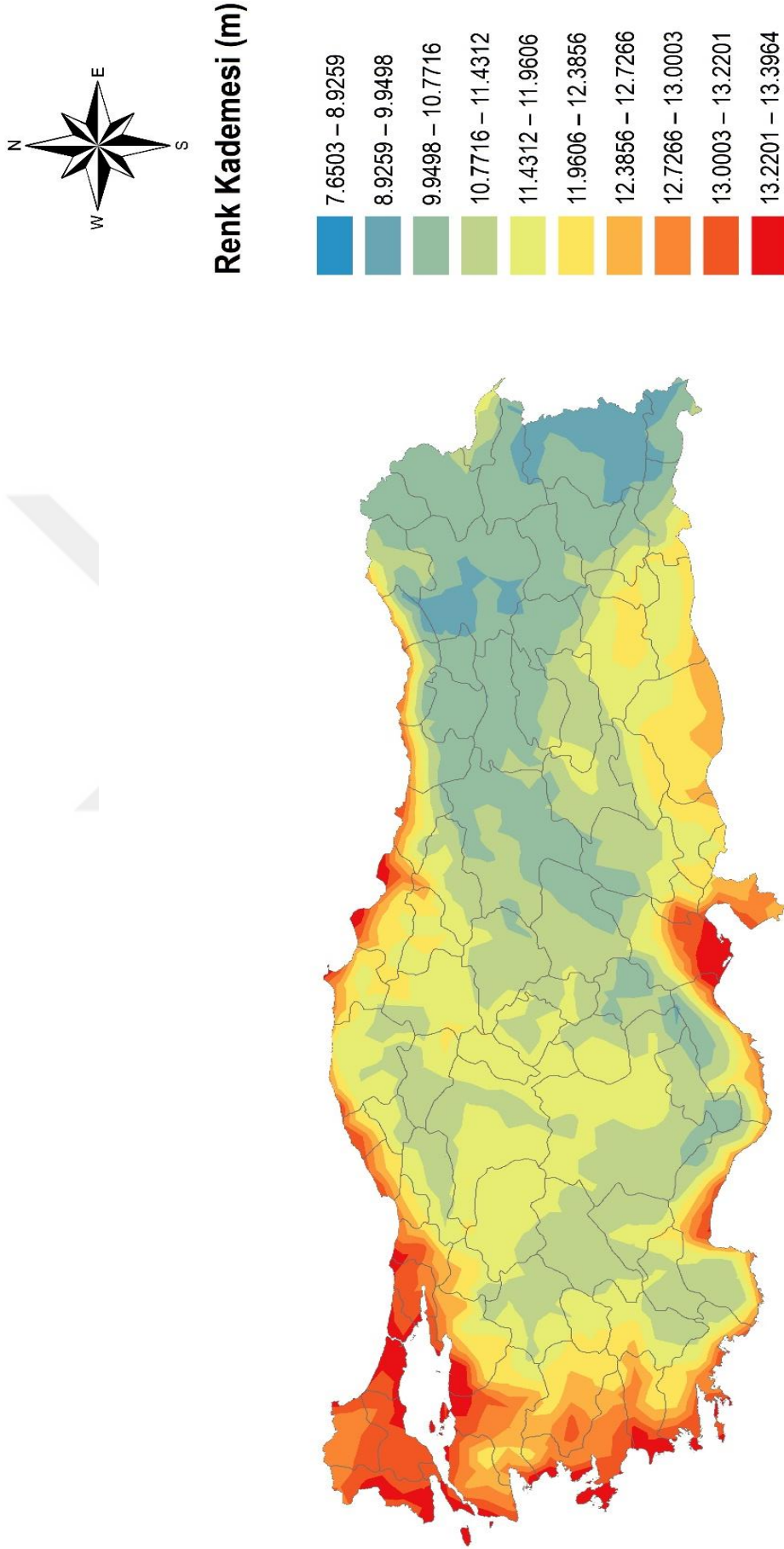
Renk Kademesi (m)



Şekil 5.5. 7.5x7.5 dakika aralıklı VMF modeline ait harita



Şekil 5.6. 7.5x7.5 dakika aralıklı NMF modeline ait harita



Şekil 5.7. 7.5x7.5 dakika aralıklı Saastamoinen modeline ait harita

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümünde hazırlanmakta olan “GNSS Kod Ölçüleri ile Mutlak Konum Belirleme (KTUN_GNSS)” isimli bir yazılım kapsamında yapılan 3 tez çalışmasından birisidir. Söz konusu yazılım; GNSS kod ölçülerinin dengeleme ve koordinat hesaplamalarını oluşturan ana modül (Ayso, 2021), iyonosferik etki hesabını içeren yardımcı modül (Kahveci ve ark., 2021) ve troposferik etki hesabını oluşturan bu modülde oluşmaktadır.

GNSS ile konum belirleme çalışmalarında noktaya ait konum doğruluğunu belirleyen çok sayıda faktör mevcuttur. Bu faktörlerden troposferik etki, özellikle nokta elipsoit yüksekliğinde hataya neden olduğundan bu etkinin mutlaka dikkate alınması ve hesaplamalarda düzeltme olarak getirilmesi gerekmektedir. Diğer taraftan, hesaplama sonuçlarından beklenen doğruluklar m seviyesinde ise modellerden hangisinin kullanıldığının bir önemi yoktur. Ancak, örneğin deprem tahmin çalışmaları gibi cm veya mm doğruluklu ve yüksek duyarlıklı çalışmalar için sonuç elde edilmek isteniyorsa, bu durumda düşük sinyal yükseklik açılarında ($2^{\circ} < E < 5^{\circ}$) etkili sonuçlar alınan NMF veya VMF modellerinin kullanılması en uygun seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır. Hesaplamalarda 20° ve üzeri yükseklik açılarının kullanılması durumunda ise hangi modelin kullanıldığının fazla bir önemi kalmamaktadır. Ancak, 20° ve üzeri yükseklik açılarının kullanılması durumunda hesaplanan nokta yüksekliklerinde daha büyük hataların elde edileceği (Ayso, 2021)’de yapılmış olan çalışmada tespit edilmiştir. Bu nedenle, günümüz GNSS hesaplamaları uydu sinyali yükseklik açıları 10° ve daha düşük açılarla yapılmaktadır.

Sonuç olarak; GNSS hesaplamalarında hangi troposferik modelin kullanılacağı tamamen yapılacak olan çalışmadan beklenen doğruluk seviyesine bağlıdır.

KAYNAKLAR

- Ayso, E., (2021), GPS L1-C1 ve Galileo E1-C1 Gözlemleri Kullanılarak Üç Boyutlu Konum Belirlenmesi Üzerine Araştırma, Yüksek Lisans, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Böhm, J. and Schuh, H., 2003, Vienna Mapping Functions, *In Proceedings of the 16th EVGA Working Meeting*, Leipzig, Germany.
- Böhm, J. and Schuh, H., 2004, Vienna Mapping Functions in VLBI Analyses, *Geophysical Research Letters*, 33, Vienna, Austria.
- Böhm, J., Niell, A. and Tregoning, P., 2006, et al, Global Mapping Function (GMF): A New Empirical Mapping Function Based on Numerical Weather Model Data, *Geophys, Res, Lett.*, 33(7).
- Böhm, J., Werl, B. and Schuh, H., 2006, Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data, *J, Geophys, Res.*, 111.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P., (Eds), 2015, Bernese GNSS Software Version 5.2, User manual, Astronomical Institute, University of Bern, DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9, Bern Open Publishing, Switzerland.
- Dow, J.M., Neilan, R.E. and Rizos, C., 2009, The international GNSS Service in a Changing Landscape of Global Navigation Satellite Systems, *Journal of geodesy*, 83, 191-198.
- Goad, C. and Goodman, L., 1974, Modified Hopfield Tropospheric Refraction Correction Model [C], *Transactions-American Geophysical Union, A, Geophysical Union*, 55(12).
- Herring, T. A., King, R. W., Floyd, M. A. and McClusky, S. C., 2018, GAMIT Reference Manual, Release 10.7, *Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology*.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Wasle, E., 2008, GNSS–Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more, Springer Science & Business Media, New York.
- Hopfield, H. S., 1969, Two-quartic Tropospheric Refractivity Profile for Correcting Satellite Data, *J, Geophys, Res.*, 74(18).
- Hopfield, H. S., 1971, Tropospheric effect on electromagnetically measured range: Prediction from surface weather data, *Radio science*, 6(3), 357-367.
- Kahveci, M., (1997), Türkiye Koşullarında Yapılan GPS Gözlemlerinde Ortam Etkilerinin Araştırılması, Doktora, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Kahveci, M., Alioğlu, D., Çetin G., 2021: Tek Frekanslı GNSS Alıcılarında Kullanılan İyonosferik Etki Düzeltme Modellerinin Karşılaştırılması, *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 428-441.
- Kahveci, M. ve Yıldız, F., 2018, Uydularla Konum Belirleme Sistemleri (GNSS): Teori ve Uygulama, 10. basım, Nobel Yayıncılık, Ankara.
- Kim, M. and Kim, J., 2015, A long-term analysis of the GPS broadcast orbit and clock error variations, *Procedia Engineering*, 99, 654-658.
- Kouba, J., 2008, Implementation and testing of the gridded Vienna Mapping Function 1 (VMF1), *J, Geod.*, 82(4-5), 193-205.
- Marini, J. W., 1972, Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile [J], *Radio Sci.*, 7(2).
- Niell, A. E., 1996, Global mapping functions for the atmosphere delay of radio wavelengths, *J, Geophys. Res.*, 101(B2).
- Niell, A. E., 2000, Improved atmospheric mapping functions for VLBI and GPS, *Earth Planets Space*, 52, 699 – 702.
- Öcalan, T. (2015), GNSS Ağlarında GPS Hassas Nokta Konumlama (GPS-PPP) Tekniği Yaklaşımlı Çözümler, Doktora, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Saastamoinen, J., 1972, Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites, The use of artificial satellites for geodesy, 15, 247-251.
- URL-1 <https://atmosfer.nedir.org/#atmosferin-katmanlari> [Ziyaret Tarihi: 29 Ağustos 2021].
- URL-2 <https://astro3d.org.au/the-fighter-jet-of-the-ionosphere/> [Ziyaret Tarihi: 30 Ocak 2021]
- URL-3 <https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/> [Ziyaret Tarihi: 10 Şubat 2021]
- URL-4 <https://aaronboda.wordpress.com/2019/01/31/what-is-ambiguity-resolution/> [Ziyaret Tarihi: 10 Eylül 2021]
- URL-5 <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> [Ziyaret Tarihi: 15 Eylül 2021]
- URL-6 https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Carrier_Phase_Ambiguity_Fixing [Ziyaret Tarihi: 15 Eylül 2021]
- URL-7 <https://www.gpsworld.com/innovation-cycle-slips/> [Ziyaret Tarihi: 15 Eylül 2021]
- URL-8 <https://www.igs.org/> [Ziyaret Tarihi: 11 Kasım 2021]

URL-9 <https://tua.gov.tr/tr/blog/dunya/dunya-nin-atmosferi-ve-katmanlari> [Ziyaret Tarihi: 30 Ocak 2022]

Wolfgang, R.D., Thaller D., 2013, International Earth Rotation and Reference Systems Service: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2014, ISBN 978-3-86482-073-1, Central Bureau, Frankfurt am Main, 157.

