

**TÜRKİYE KOŞULLARINDA YAPILAN GPS GÖZLEMLERİNDE
ORTAM ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Muzaffer KAHVECİ

66413

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 EYLÜL 1996

Tezin Savunulduğu Tarih : 7 OCAK 1997

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Ahmet AKSOY (İTÜ)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof.Dr. Tevfik AYAN (İTÜ)

Prof.Dr. Rasim DENİZ (İTÜ)

Prof.Dr. Onur GÜRKAN (BÜ)

Prof.Dr. Hüseyin DEMİREL (YTÜ)

OCAK 1997

ÖNSÖZ

Bu çalışmam süresince değerli katkıları ile bana her konuda destek olup, yardım ve ilgisini esirgemeyen ve beni yönlendiren hocam sayın Prof.Dr. Ahmet AKSOY'a, tezin incelenmesi aşamasında yapılan olumlu eleştirilerle çalışmamın daha iyi olmasını sağlayan Prof.Dr. Onur GÜRKAN, Prof.Dr. Tevfik AYAN, Prof.Dr.Hüseyin DEMİREL ve Prof.Dr.Rasim DENİZ'e, tezin yazımı aşamasında özellikle şekillerin çiziminde büyük gayret sarfeden Müh. Mustafa OCAK'a ve ayrıca bu tezin temelini oluşturan sayısal uygulamalar için her türlü bilgisayar ve yazılım olanaklarını sağlamış olan Alman Uygulamalı Jeodezi Enstitüsü (IfAG) personeline sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

EYLÜL 1996

Muzaffer KAHVECİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
SEMBOL LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
TABLO LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
SUMMARY.....	xi
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. ATMOSFER İLE İLGİLİ GENEL TANIMLAR	3
2.1. Atmosferin Tabakaları	4
2.2. Elektromanyetik Dalgaların Yayılmasında Atmosferik Etki ve Atmosferin Kırılma İndisi (Refractive Index).....	6
BÖLÜM 3. İYONOSFER.....	11
3.1. Genel.....	11
3.2. İyonosferik Gecikme Etkisi.....	12
3.3. Görelî İyonosferik Gecikme Etkisi.....	19
3.4. Sayısal Uygulama.....	22
BÖLÜM 4. TROPOSFER.....	30
4.1. Genel.....	30
4.2. Troposferik Gecikme Etkisi.....	31
4.3. Troposferik Gecikme Etkisinin Hesabı İçin Gerekli Atmosferik Parametrelerin Ölçümü.....	39
4.3.1. Gözlem Noktasında Ölçülen Meteorolojik Parametreler (SM).....	39

4.3.2. Standart Atmosfer Modellerinden Yararla Troposferik Etkinin Hesabı	41
4.3.3. Su Buharı Radyometreleri (WVRs).....	42
4.4. Troposferik Parametrelerin Hesabı	43
4.4.1. Troposferik Parametrelerin Deterministik Yöntemle Hesaplanması	44
4.4.2. Troposferik Parametrelerin Stokastik Olarak Hesaplanması	46
4.5. Bernese Yazılımında Troposferik Etki	49
4.6. Troposferik Gecikme Değerlerinin Jeodezik Parametrelere Olan Etkileri	52
4.6.1. Görelî Troposferik Gecikme Etkisi	52
4.6.2. Mutlak Troposferik Gecikme Etkisi	54
4.7. Sayısal Uygulama.....	56
BÖLÜM 5. SİNYAL YANSIMASI (MULTIPATH).....	84
5.1. Genel	84
5.2. Kod Gözlemleri için Sinyal Yansıma Etkisi (Pseudorange Multipath)	86
5.3. Taşıyıcı Dalga Fazı Sinyal Yansımaları (Carrier Phase Multipath)	88
BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	91
6.1. İyonosferik Etki İle İlgili Sonuçlar	91
6.2. Troposferik Etki İle İlgili Sonuçlar	92
6.3. Sinyal Yansıma Etkisi İle İlgili Sonuçlar.....	95
KAYNAKLAR	98
EKLER	110
ÖZGEÇMİŞ	118

SEMBOL LİSTESİ

a, b, c	: İntegrasyon Sabitleri
G	: Uydu ile Alıcı(receiver) Arasındaki Geometrik Uzaklık
ΔL	: Sinyal Yolundaki Fazla Uzunluk (Excess Path Length)
$n(s)$	: Atmosferin Kırılma İndisi
N	: Kırıcılık
TEC	: Uydu-Alıcı Arasındaki Sinyal Yolu Boyunca Olan Toplam Elektron Sayısı
ρ	: Uydu-Alıcı Arasındaki Ham Uzaklık (Pseudorange)
VEC	: Düşey Doğrultudaki Serbest Elektron Sayısı
L_3	: İyonosferden Bağımsız Lineer Kombinasyon
c	: Işık Hızı, 299792458 ± 12 m/sn
σ	: Standart Sapma
N_d	: Atmosferin Kuru Bileşeni
N_w	: Atmosferin Islak Bileşeni
S	: Kısa Dönemli Tekrarlanabilirlik Ölçütü (Short Term Repeatability)
β	: Sinyal Genliği
α	: Azaltma Faktörü (Damping Factor)
A_d	: Doğrudan Gelen Sinyalin Kuvveti
A_r	: Yansıtılarak Gelen Sinyalin Kuvveti
ψ	: Taşıyıcı Dalga Fazındaki Sinyal Yansıma Hatası

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil- 2.1.	Sıcaklıklarına Göre Atmosferin Katları	6
Şekil- 2.2.	Atmosferik Kırılma	7
Şekil- 3.1.	İyonosfer Tabakaları	12
Şekil- 3.2.	Homojen Bir İyonosfer Tabakasında Görelî Etkî	19
Şekil- 3.3.	Görelî İyonosferik Etkî-Uydu Yükseklik Açısı İlişkisi	21
Şekil- 3.4.	Tek Tabaka (Single Layer) Modeli	23
Şekil- 3.5.	SLR Noktaları GPS Bazları	24
Şekil- 3.6.	AGTA GPS Bazları	25
Şekil- 4.1.	Yer Atmosferinin Yapısı	30
Şekil- 4.2.	$N_d(s)$ ve $N_w(s)$ için Yükseklik Profili	34
Şekil- 4.3.	Projeksiyon Fonksiyonları (Mapping Functions) Arasındaki Farklar (3-9 derece)	38
Şekil- 4.4.	Projeksiyon Fonksiyonları (Mapping Functions) Arasındaki Farklar (10-20 derece)	38
Şekil- 4.5.	Projeksiyon Fonksiyonları (Mapping Functions) Arasındaki Farklar (20-90 derece)	39
Şekil- 4.6.	Üç Parametre Kestirimi Problemi	47
Şekil- 4.7.	Troposferik Gecikme Hesabı İş Akışı	51
Şekil- 4.8.	Türkiye'de GPS Ölçüsü Yapılan Noktalar	59
Şekil- 4.9.	Değerlendirmede Kullanılan Bazlar	61
Şekil- 4.10.	Yöntem-A, Koordinat Tekrarlanabilirliği	68
Şekil- 4.11.	Yöntem-B, Koordinat Tekrarlanabilirliği	69
Şekil- 4.12.	Yöntem-C, Koordinat Tekrarlanabilirliği	69

Şekil- 4.13. Yöntem-D, Koordinat Tekrarlanabilirliği	69
Şekil- 4.14. Yöntem-E, Koordinat Tekrarlanabilirliği	70
Şekil- 4.15. Yöntem-F, Koordinat Tekrarlanabilirliği	70
Şekil- 4.16. Yöntem-G, Koordinat Tekrarlanabilirliği	71
Şekil- 4.17. Yöntem-H, Koordinat Tekrarlanabilirliği	71
Şekil- 4.18. Yöntem-I, Koordinat Tekrarlanabilirliği	72
Şekil- 4.19. Yöntem-A, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu	72
Şekil- 4.20. Yöntem-B, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu	72
Şekil- 4.21. Yöntem-C, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu	73
Şekil- 4.22. Yöntem-D, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu	73
Şekil- 4.23. Yöntem-E, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu	73
Şekil- 4.24. Yöntem-F, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu	74
Şekil- 4.25. Yöntem-G, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu	74
Şekil- 4.26. Yöntem-H, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu	74
Şekil- 4.27. Yöntem-I, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu	75
Şekil- 4.28. Yöntem-A, Baz Tekrarlanabilirliği	75
Şekil- 4.29. Yöntem-B, Baz Tekrarlanabilirliği	76
Şekil- 4.30. Yöntem-C, Baz Tekrarlanabilirliği	76
Şekil- 4.31. Yöntem-D, Baz Tekrarlanabilirliği	76
Şekil- 4.32. Yöntem-E, Baz Tekrarlanabilirliği	77
Şekil- 4.33. Yöntem-F, Baz Tekrarlanabilirliği	77
Şekil- 4.34. Yöntem-G, Baz Tekrarlanabilirliği	78
Şekil- 4.35. Yöntem-H, Baz Tekrarlanabilirliği	78
Şekil- 4.36. Yöntem-I, Baz Tekrarlanabilirliği	78
Şekil- 4.37. Yükseklik Farkı-Troposferik Düzeltme İlişkisi	79
Şekil- 4.38. Yükseklik Farkı-Baz Uzunluğu İlişkisi	81

Şekil- 5.1.	Uydu Sinyal Yansıması (Satellite Multipath)	84
Şekil- 5.2.	Alıcı Anteni Sinyal Yansıması	85
Şekil- 5.3.	P-Kod Pseudorange Multipath	87
Şekil- 5.4.	Chip Uzunluğu (Code Chip Length Window)	87
Şekil- 5.5.	İkili Faz Farkı (Double Difference) Gözlemlerinde Gözlenen ve Hesaplanan (Düz Çizgi) Multipath Etkisi	90
Şekil- A.1.	Essen-Froome Diferansiyel Modeli	117



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo- 2.1. Uydu Yükseklik Açısı - Eğilme Miktarı İlişkisi	9
Tablo- 3.1. İyonosferik Model Katsayıları ve Değerleri	18
Tablo- 3.2. 1991 Yılı SLR Noktaları GPS Gözlem Bilgileri	25
Tablo- 3.3. Uzun Bazlar Değerlendirme Sonuçları	26
Tablo- 3.4. 1990 Yılı AGTA Noktaları GPS Gözlem Bilgileri	27
Tablo- 3.5. Kısa Bazlar Değerlendirme Sonuçları	28
Tablo- 4.1. k_1 , k_2 ve k_3 için Deneysel Olarak Belirlenmiş Değerler	33
Tablo- 4.2. ΔS_d ve ΔS_w Değerleri	35
Tablo- 4.3. Troposferik Modeller (Mapping Functions)	37
Tablo- 4.4. Troposferik Gecikmenin $Z=0^\circ$ Doğrultusunda Meteorolojik Parametrelere Olan Bağımlılığı	40
Tablo- 4.5. File-1	50
Tablo- 4.6. File-2	50
Tablo- 4.7. File-3	50
Tablo- 4.8. MARMARA94 GPS Kampanyası Nokta Listesi	60
Tablo- 4.9. MARMARA94 GPS Kampanyası Ölçü Planı	62
Tablo- 4.10. Değerlendirmede Kullanılan Noktalar	63
Tablo- 4.11. GPS Bazlarını Değerlendirme Stratejileri	64
Tablo- 4.12. Değişik Modeller İle Kampanya Çözümleri Özeti (Yükseklik Farkı)	65
Tablo- 4.13. Değişik Modeller İle Kampanya Çözümleri Özeti (Baz Uzunluğu)	66
Tablo- A.1. B Katsayısı İçin Değerler	111
Tablo- A.2. δL Düzeltme Terimleri	111

ÖZET

Son yıllarda bilimsel amaçlı olarak kullanılan uydu tekniklerinde çok önemli gelişmeler olmuştur. Uydu sistemlerindeki bir çok hata kaynağı ise bu gelişmeler sonucu hemen hemen giderilmiştir. Örneğin, uydu saati hataları başlangıçta, uydu gözlemlerinde, önemli bir hata kaynağını oluşturmaktayken bugün özellikle GPS uydularında atomik (Hydrogen Masers) saatlerin kullanılması ile bu hata kaynağı gözardı edilebilecek kadar azaltılmıştır.

GPS'in Jeodezik ve Jeodinamik amaçlı uygulamalarında temel olarak uydu-alıcı arasındaki uzaklığın duyarlı olarak belirlenmesi söz konusu olduğundan bu uzaklığın belirlenmesinde etkili olan tüm hata kaynaklarının doğru olarak hesaplanması ya da modellenmesi gerekmektedir. Günümüzde GPS, yukarıda belirtilen amaçlar için yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Bilindiği gibi yüksek duyarlılık isteyen çalışmalarda göreceli konumlama yöntemi ve faz ölçüleri tercih edilmektedir. Uydu tekniklerindeki son gelişmeler sonucu artık bu ölçülerdeki en önemli hata kaynağını ortam etkileri (atmosferik etkiler ve multipath) oluşturmaktadır. Dolayısıyla, GPS ile elde edilen ölçülere Jeodezik ve Jeodinamik amaçlarla kullanılmadan önce mutlaka atmosferik düzeltmeler getirilmelidir.

Bu çalışmada ortam etkileri, iyonosferik etki, troposferik etki ve sinyal yansıma (multipath) etkisi olarak üç bölümde incelenmektedir. Yukarıda belirtilen her bir etki koordinat bileşenlerini (enlem, boylam, elipsoit yüksekliği) ve baz uzunluklarını farklı şekilde etkilediğinden her bölüm için ayrı sayısal uygulama yapılmış ve GPS ölçülerinin değerlendirilmesiyle ilgili ölçme ve hesaplama önerileri belirlenmiştir.

SUMMARY

INVESTIGATION ON THE EFFECTS OF PROPAGATION ERRORS ON GPS OBSERVATIONS IN TURKEY REGION

In order to obtain high precision measurements via space techniques, it is essential to know the influence of the propagation errors (atmospheric effects and multipath) on these measurements.

Today, GPS is being used intensively for geodetic and geodynamics purposes. For scientific studies which require high precision the relative static positioning technique using phase observations are preferred. However, in phase observations one of the most important error sources is atmospheric delay. Consequently, atmospheric corrections should be applied to the measurements obtained via GPS before using them for geodetic, geodynamics and astronomical purposes. As it is well-known, GPS (microwave) signals arrive at the receiver passing through the Earth's atmosphere, which not only bends the ray, but also slows it (figure-1).

In processing, it is normally the straight line G plus the path length outside the atmosphere which is required. This can be expressed as,

$$G = \int_a^c dG \quad (1)$$

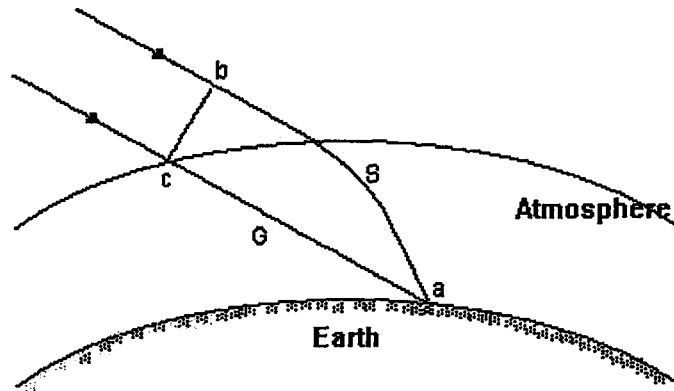


Figure 1. Atmospheric Effects

But in reality this is not the situation. Since the electromagnetic waves follow the minimum electrical path length (Fermat's principle) between two points normally the measured length ; S , can be written as

$$S = \int_a^b n \cdot dS \quad (2)$$

Here, n is the refractive index of the atmosphere.

Since it is important to determine the excess path length in GPS processing, this excess path length (ΔL) can be given as,

$$\Delta L = S - G = \int_a^b (n(s) - 1) \cdot dS + \int_a^b dS - \int_a^c dG \quad (3)$$

There are two reasons for ΔL :

(a) Since the refractive index is greater than unity, this slows the signals coming from the vacuum into the atmosphere,

(b) Since the coming signal is bent, they cannot follow a straight line.

So, the above equation shows that the error in GPS observation is due to two components. These are,

(a) The excess path length due to the propagation delay,

$$\int_a^b (n(s) - 1) \cdot dS$$

(b) The excess path length due to bending,

$$\int_a^b dS - \int_a^c dG$$

The second of these is usually not significant except at low observation angles (Table-1).

Table-1. Cut-off elevation-bending values relationships

Elevation Angle (°)	Bending Effect (m)
2	0.417
5	0.075
10	0.019
20	0.005
45	0.001
90	0.000

If we express the propagation delay in terms of the refractivity, N , of the atmosphere using the relationships

$$N=(n-1) \times 10^6 \quad (4)$$

We can write the excess path length due to propagation delay as

$$\Delta L = 10^{-6} \int_a^b N(s) ds \quad (5)$$

When it is taken into consideration that the GPS signals arrive at the receiver passing through the atmosphere, there are two atmosphere layers which affect the GPS observations. They are Ionosphere and Troposphere. Ionosphere is upper of the two layers, extending from about 50 km up to approximately 500 km. Troposphere is the region below this, extending from ground level up to the base of the ionosphere. These two layers, therefore, affect the GPS observations in different ways. Consequently, they are dealt with separately. Since their effects are different on GPS observations, they are taken into consideration using different modelling and techniques in GPS processing.

On the other hand, multipath is completely a different error source on GPS measurements. As it is known, GPS receiver antennas are omnidirectional. So, depending on the terrain where the antenna is set up and the chosen cut-off elevation angle undesired satellite signals can be recorded in the receiver. As a definition, multipath is the phenomenon whereby a satellite emitted signal arrives at the receiver via two or more routes. This situation is mainly caused by reflecting surfaces near the receiver. Besides, multipath can occur at both end of the system. These are called antenna and satellite multipath, (Figure-2 and 3).

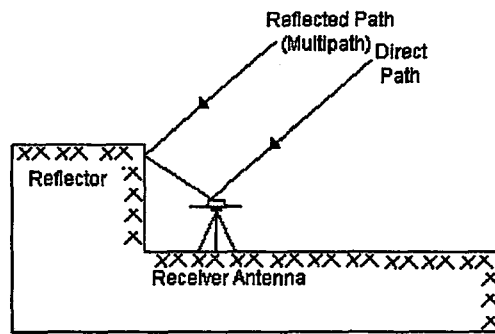


Figure-2. Antenna Multipath

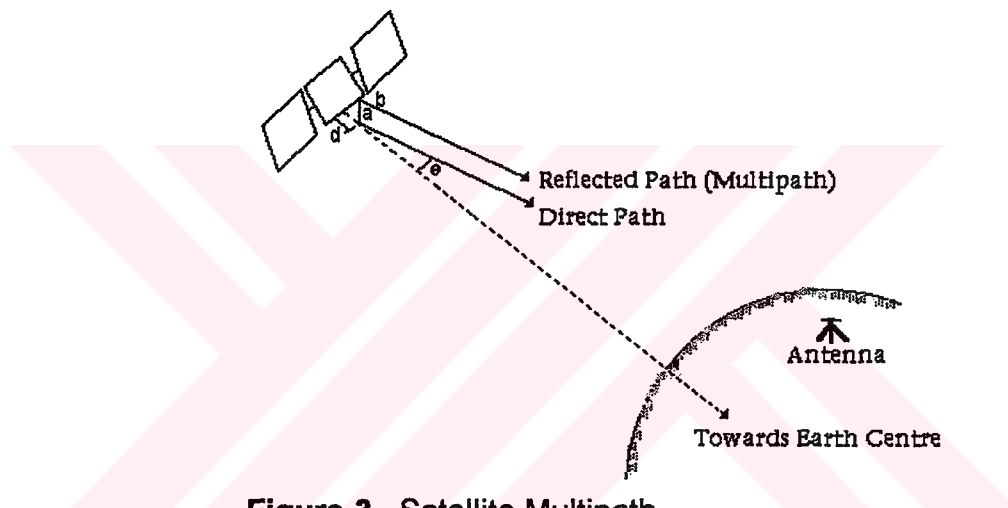


Figure-3. Satellite Multipath

Multipath effects cause serious problems for a GPS receiver in an environment of reflecting surfaces. And, there is no general model of the multipath effect due to the arbitrarily different geometric situations. However, the influence of the multipath can be estimated by using a combination of L1 and L2 code and carrier phase measurements.

From the geometry it is clear that signals received from low satellite elevations are more susceptible to multipath than signals received from high elevations. And code ranges are more strongly affected by multipath than carrier phases.

There can be counted many measures against multipath. The most effective measure is to avoid it. That is, it is the best measure to avoid reflecting surfaces as far as possible.

Except for the above mentioned measures against multipath there are other methods. For example, using an antenna which takes advantage of signal polarization, or using digital filtering, wide band antennas, or radio frequency absorbent antenna ground planes reduce the interference of satellite signals.

For the investigation of ionosphere errors induced on GPS baselines, two long and two short baselines are selected. For the long baselines, GPS observations performed at 3 SLR sites (Yığılca, Yozgat and Melengiçlik) in 1991 are processed. For the short baselines, GPS observations performed at Ankara GPS Test Network (AGTN) in 1990 are processed. Processings were done using Bernese Software version 3.3 at General Command of Mapping (GCM). Processing results were compared with the SLR values of the long baselines and the EDM distances of the short baselines. As a result it is seen that it is almost better to use L1&L2 strategy with ambiguity fixed solutions for the short baselines (< 20 km). And for the long baselines (> 50 km) it is better to use L3 linear combination strategy with/without ambiguity fixed solutions.

For the investigation of tropospheric errors especially on GPS heights several processing strategies were applied. As a result, it became clear that if highly precision and well calibrated meteorological instruments are used for recording surface meteorological data (SM) and by using these measured SM values and estimating residual tropospheric parameters at N points give comparable results. On the other sites, an alternative method is to use a standard atmospheric model and solve for residual tropospheric parameters. In this study it is concluded that both methods are compatible. Hence, in order to obtain tropospheric bias free height values, processing SM data obtained using high quality and expensive meteorological instruments do not lead to more accurate GPS height results than using a standard atmosphere and estimating residual tropospheric parameters. So, it is more economical and easier way to use a standard atmosphere model and estimate residual tropospheric parameters in processing of GPS observations. In order to show the effects of tropospheric errors on GPS observations, real GPS data

were used in processings which were collected during the Marmara GPS Campaign performed in 1994 in Turkey with the collaboration of General Command of Mapping (GCM), Technical University of İstanbul (İTU) and Technical University of Zurich (ETHZ).

This study consists of 6 sections. In the first section introduction is presented. General descriptions and information relevant to atmosphere are given in section 2; and Ionosphere and troposphere are dealt with separately in sections 3 and 4, respectively. Section 5 deals with multipath and in section 6 results are given.



BÖLÜM 1. GİRİŞ

Bilindiği gibi jeodezik amaçlı bir uydu sistemi olan TRANSİT 1967 yılından bu yana sivil amaçlar için kullanılmaktadır. Bununla birlikte söz konusu sistem ile birkaç günlük Doppler ölçüsü yapılarak ancak desimetre mertebesinde doğruluk elde edilebilmektedir. Transit'ten elde edilen deneyimler sonucu, hava şartlarından etkilenmeden sürekli gözlem yapabilme ve yeryüzünde tek anlamlı, süratli ve doğru konum belirlemeye olanak veren bir sistem gereksinimi ortaya çıkmıştır.

Daha sonraları alıcı (GPS Receiver) sistemlerindeki gelişmelerle ve bu alıcıların kullanımı ile yüksek doğruluklu bazlar elde edilebilmiş ve bu sayede Transit sisteminden GPS'e geçiş dönemi başlamıştır. GPS'in jeodezik, jeodinamik ve jeofizik amaçlı olarak kullanımından elde edilen ve farklı araştırmacılar ([1],[2]) tarafından yayımlanan sonuçlar göstermiştir ki bu sistemin sağladığı duyarlı konum belirleme olanağı ile GPS, bilim adamları ve ölçmeciler için hızla gelişen sağlam temellere dayalı ve ekonomik bir sistemdir.

GPS sistemi, bugüne kadar insan tarafından yapılmış en önemli gelişmelerden biri olarak düşünülebilir. Çünkü, GPS günümüzde artık yalnızca navigasyon ve askeri amaçlı değil fakat günlük yaşantının hemen her aşamasında kullanılabileceğimiz bir sistem halini almıştır. Örneğin kara, hava ve deniz araçlarının navigasyonu, yer kontrol noktası olmaksızın havai nirengi uygulaması, deformasyon ölçmeleri, hobi amaçlı olarak (dağcılık, koşarak hedef bulma, yüksek doğruluklu zaman transferi vs.) kullanımlar, DGPS uygulamaları, askeri amaçlı kullanımlar, bugün GPS'in kullanıldığı alanlardan yalnızca birkaçıdır.

Bu kadar çok kullanım alanı olmasına karşın tüm diğer sistemlerde olduğu gibi GPS'in de bazı zayıf tarafları vardır. Diğer bir ifadeyle GPS ölçülerinden elde edilen sonuçları da etkileyen bazı rastlantısal ve sistematik sapmalar (bias) söz konusudur. Bu sapmaların bazıları göreceli konumlama yöntemi kullanılması durumunda bile bozucu etkilerini sürdürmektedir. Söz konusu

sapmalar yukarıda ifade edilen birçok kullanım alanı için fazla önemli bir sakınca oluşturmamakla birlikte özellikle bilimsel amaçlı çalışmalarda (doğru konum belirleme, yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesi, jeoid belirleme gibi GPS ölçülerinden yüksek doğruluk beklendiği durumlarda) bunların davranışı ve büyüklüğü çok iyi modellendirilmeli ve kontrol altında tutulmalıdır.

Yukarıda ifade edilen sapmaları farklı şekillerde sınıflandırmak olanaklı olmakla birlikte bunlar çok genel olarak uydulara bağımlı sapmalar, alıcı donanımına bağlı sapmalar ve ortam etkileri şeklinde ifade edilebilir. Bununla ilgili daha ayrıntılı sınıflama [18]'de verilmektedir.

Bu çalışmada söz konusu hata kaynaklarından (bozucu etki) yalnızca ortamın GPS ölçüleri üzerindeki bozucu etkileri ile atmosferik etkiler (iyonosfer ve troposferin GPS ölçülerine olan bozucu etkileri) ve ölçü yapılan noktanın çevresindeki doğal ve yapay detayların neden olduğu sinyal yansıması (multipath) incelenmektedir.

Gerek uzay tekniklerinde gerekse jeodezik, jeofizik ve jeodinamik amaçlı olarak kullanılan aletlerde son yıllardaki gelişmeler, bu teknik ve aletlerle elde edilen duyarlıkların çok büyük değerlere ulaşması nedeniyle atmosferin GPS ölçüleri üzerindeki etkisinin çok daha dikkatli olarak ele alınması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Diğer bir ifadeyle, atmosferik etkiler artık günümüzde yüksek duyarlık isteyen çalışmalarda doğruluğu sınırlayıcı en önemli faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle GPS ile ölçüm tekniğinde radyo dalgalarının uydu-alıcı arasında atmosfer boyunca katettiği yol dikkate alınırsa, bu mikrodalgaların uydulardan alıcıya gelene kadar geçtiği atmosfer katmanları boyunca maruz kaldığı çeşitli bozucu etkilerin yeterince doğru olarak modellendirilmesi ya da hesaplanması gerekmektedir.

Bu çalışma 6 bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde Giriş, ikinci bölümde atmosfer ile ilgili genel tanımlar, üç ve dördüncü bölümlerde sırayla ionosfer ve troposferin GPS kod ve faz ölçülerindeki bozucu etkileri ve bunların giderilmesinde kullanılan yöntemler sayısal uygulamalarla verilmektedir. Sinyal yansıma (multipath) etkisi ile ilgili bilgi beşinci bölümde, sonuçlar ve öneriler ise altıncı bölümde sunulmaktadır.

BÖLÜM 2. ATMOSFER İLE İLGİLİ GENEL TANIMLAR

Yeryüzünü çevreleyen gaz küreye (gaz tabakasına) atmosfer ya da havaküre adı verilmektedir. Atmosfer kelimesi eski Yunanca'dan atmos ve sphaira (küre) sözcüklerinin birleşmesinden meydana gelmektedir. Daha geniş anlamda atmosfer, herhangi bir gök cismini çevreleyen gaz tabakası olarak tanımlanabilir [3].

Dünyamızda atmosferin yalnızca, Litosfer (taş küre) ve Hidrosfer (su küre) ile temas ettiği yerlerde canlılar için uygun yaşam koşulları vardır. Atmosferde mevcut olan gazlar, yaşamın gelişmesini sağladığı gibi, ayrıca güneşten gelen enerjinin hızla uzaya dönmesini önlemekte ve ışığın yansıyıp dağılarak gölge yerlerin karanlık olmasını, güneş ışınlarını alan yerlerin çok sıcak, almayan yerlerin ise çok soğuk olmasını engellemektedir [4]. Bunlardan başka atmosfer, güneşten gelen zararlı ışınların yeryüzüne ulaşmasını da engellemektedir.

Atmosfer genel olarak alt atmosfer ve üst atmosfer katları şeklinde düşünülebilir. Hava olaylarının çok sık ve etkin olduğu bölüm atmosferin alt katlarıdır. Alt atmosfer katları ile ilgili güvenilir bilgiler henüz 20. yüzyılın başlarından itibaren elde edilmeye başlanmıştır. Günümüze kadar yüksek atmosfer katlarına ait bilgilerin atmosferin alt katlarına göre çok kesin ve fazla olduğu söylenemezdi. Ancak teknolojiye gelişmeler ve bunun sonucunda da bilimsel çalışmalarda yüksek duyarlıklı güvenilir sonuçlara olan gereksinimin artması nedeniyle atmosferin yapısı hakkında da kesin ve güvenilir bilgiler elde edilmektedir. Nitekim, yapay uydu sistemlerinin bilimsel amaçlarla kullanılmaya başlamasıyla, günümüzde, roket, radyo sondaj, su buharı radyometreleri (WVR; Water Vapour Radiometers) ve meteorolojik uydular kullanılarak atmosferin üst tabakaları hakkında da daha fazla ve güvenilir bilgiler elde edilmektedir. Atmosferin üst sınırı için farklı kaynaklarda farklı değerler bulunmakla birlikte modern tekniklerle elde edilen son bilgilere göre bu sınırın yaklaşık 3000 km yi bulduğu kabul edilmektedir [5].

Bir çok gazın birleşiminden meydana gelen atmosfer, koruyucu bir zarf halinde yeryüzünü kuşatır ve yer çekimi nedeniyle de bir ağırlığa sahiptir. Atmosferin bu ağırlığı, içindeki ve altındaki maddeler üzerinde bir basınç biçiminde kendini gösterir. Buna Hava Basıncı denir. Hava basıncı 45 derece enleminde, deniz seviyesinde ve 15 °C de, 1 cm çaplı bir boru içindeki bir civa sütununu 760 mm yükseklikte tutabilmektedir. Bu kuvvete Normal Hava Basıncı denir [4].

2. 1. Atmosferin Tabakaları

Atmosferi oluşturan gazlar, yerden itibaren, ağırlıklarına göre iç içe küreler halinde sıralanmışlardır. Bu farklı tabakaların tanınmasında gaz karışımlarının fiziki özellikleri, sıcaklıkları ve bileşimleri esas alınmıştır [4].

Atmosferin tabakalara ayrılmasında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Örneğin atmosfer, var olan gazlara, gazların fiziksel-kimyasal özelliklerine ve sıcaklıklarına göre bölümlere ayrılabilir. Meteorolojik açıdan en uygunu, atmosferi, gazların sıcaklıklarına göre katlara ayırarak incelemektir. 1951 Brüksel Uluslararası Kongresinde teklif edilen terimler aşağıda verilmektedir, (Şekil 2.1).

Sıcaklık derecesinin düşey doğrultudaki değişmesi gözönünde tutularak şu tabaka sınıflandırılması yapılabilir ;

Troposfer (alçak atmosfer) ; orta veya yukarı paralellerde 8-12 km, ekvator üzerinde 16-18 km kalınlıkta bir kesimdir. Sıcaklığı yükseklikle orantılı olarak azalır. Bu azalma, şartların pek düzensiz olduğu yere yakın ilk kilometreler dışında, 100 metrede 0.6 °C dir. Bu tabakanın tümünde klasik meteoroloji olayları görülür (nem, bulut, yağmur, kar, dolu, çığ vb.).

Stratosfer; sıcaklığı hemen hemen sabit olup troposferin üst sınırından itibaren yaklaşık 50 km'ye kadar olan bölümdür. (Bu tabakada atmosferik olaylar görülmez. Tabaka boyunca yatay ve dikey olarak sıcaklık değişimleri çok azdır. Troposfere göre çok kuru ve hemen hemen bulutsuzdur. bu tabakada yer çekimi olmadığından cisimler ağırlıklarını kaybederler).

Mezosfer; sıcaklığın tekrar düşmekte olduğu kesimdir. Bu tabaka 80-90 km'ye doğru sona ermekte, atmosferin en düşük sıcaklık derecesine (-90°C) burada ulaşılmaktadır.

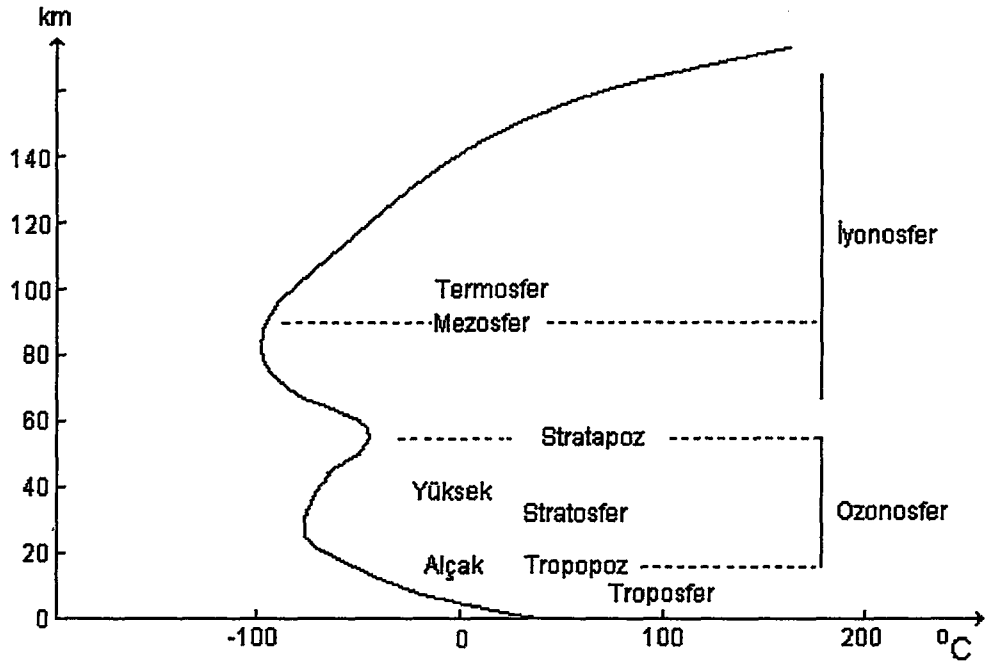
İyonosfer (Termosfer); Mezosfer tabakasından sonra iyonosfer tabakası bulunmaktadır. Burada sıcaklık, 200 km dolaylarına kadar hızla, sonra daha yavaş olarak artar.

İlk üç tabakayı birbirinden ayıran sınırlar ise sırasıyla, tropopoz, stratopoz ve mezopoz olarak isimlendirilmektedir.

Sıcaklığa göre atmosfer içinde oluşan katlar esas olarak, gazların güneş ışınlarını emme özelliklerine bağlı olarak oluşmuştur. Dolayısıyla yukarıda belirtilen katları daha somut değerlerle aşağıdaki şekilde tanımlayabiliriz.

Yerden (deniz düzeyinden) ortalama 13 km yüksekliğe kadar sıcaklık düzenli bir şekilde azalarak, örneğin yerde 15 °C olan sıcaklık 13 üncü km'de -50: -60 °C değerlerine ulaşmaktadır. 13 üncü km'ye kadar olan bu kata troposfer adı verilmektedir. 13-45 km'ler arasında artan sıcaklık 45 inci km'de -45 °C dolaylarında olup bu kata stratosfer denir. Stratosferin üstünde 45-80 km'ler arasında sıcaklık tekrar düşmektedir. Bu kata da mezosfer denmektedir. Artık bu kattan itibaren sıcaklık hızla artmaya başlamakta olup buna da termosfer denmektedir. Termosferde gaz moleküllerinin sıcaklığı çok fazladır. Örneğin, gaz moleküllerinin sıcaklığı 180 km dolaylarında 1100-1650 °C yi bulmaktadır [4].

Atmosferi, kimyasal bileşimi gözönünde tutarak alt bölümlere ayırmak, çeşitli gruplar meydana getirilmesi yüzünden daha güçtür. Yeryüzü ile 100 km arasında olan ve başlıca maddelerinin (azot ve oksijen) oranı değişmeyen tabakaya Homosfer denmektedir. Daha yukarıda yer alan Heterosfer'in özelliği, bu tabakada azottan başka hidrojen ve helyum gibi hafif gazların çok miktarda bulunmasıdır. Yaklaşık 1000 km'den itibaren ise Ekzosfer başlamaktadır [3].

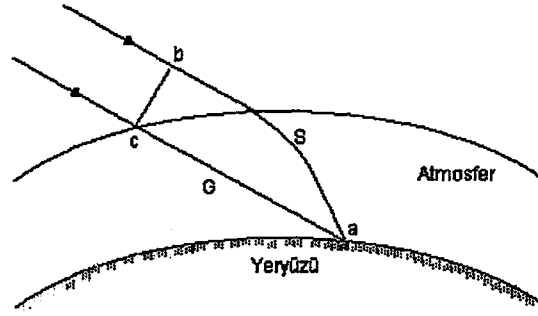


Şekil-2.1. Sıcaklıklarına Göre Atmosferin Katları

Atmosferin kimyasal elementleri arasında meteoroloji bakımından en önemlisi su buharıdır. Bu, su yüzeylerindeki buharlaşmadan ve bitkilerin terlemesinden oluşmaktadır. Bu nedenle, yükseklik arttıkça hava içindeki su buharı oranı hızla düşmektedir. Su buharının dörtte üçü 4000 m'nin altında bulunmaktadır. Tropopoz üstünde hava tamamen kurudur [3].

2.2. Elektromanyetik Dalgaların Yayılmasında Atmosferik Etkiler ve Atmosferin Kırılma İndisi (Refractive Index):

Bilindiği gibi ışık ya da radyo dalgaları ister VLBI (quasarlardan) ve GPS uydularından gelen sinyaller, isterse SLR (Satellite Laser Ranging) lazer ışınları olsun, yeryüzüne ya da uzaya atmosferden geçerek ulaşırlar. Atmosferden geçen bu sinyallerin, atmosferin farklı katmanlarındaki kırılma indislerinin farklı olmasından dolayı, hem izlediği yolda hem de hızında değişme olur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Atmosferik Kırılma

Normal olarak GPS ölçüleri sonucu elde edilmesi gereken uzunluk atmosfer dışında kalan sinyal yolu ile şekil 2.2' de görülen G geometrik uzaklığının toplamıdır. Burada,

$$G = \int_a^c dG \quad (2.1)$$

ile verilmektedir [7].

Ancak gerçekte durum böyle değildir. Elektromanyetik dalgalar iki nokta arasındaki en kısa yolu izledikleri için ölçülen uzunluk minimum sinyal yolu (Fermat yasası) olarak bilinen S uzunluğu(optik yol) olup bu da,

$$S = \int_a^b n.(s)ds \quad (2.2)$$

ile verilmektedir. Burada, $n(s)$ atmosferin (değişken) kırılma indisi (Refractive index) dir [7].

Sonuç olarak sinyal yolundaki fazlalık (excess path length) ΔL ,

$$\Delta L = S - G = \int_a^b (n(s) - 1). ds + \int_a^b ds - \int_a^c dG \quad (2.3)$$

eşitliği ile verilmektedir [7].

Boşluktaki sinyal yolu (G) ile gerçekte olan sinyal yolu (S) arasındaki farkın iki nedeni vardır:

(1) Kırılma indisi (refractive index) bir'den büyük olduğu için bu da boşluktan atmosfere giren sinyalin yavaşlamasına neden olur.

(2) Atmosfere giren sinyal yörünge eğriliğine sahip olduğu (kırıldığı) için düz bir hat izlemez.

Dolayısıyla (2.3) eşitliği ile GPS ölçülerindeki hatanın iki bileşenden oluştuğu kabul edilmekte olup bunlar,

a. Atmosfer nedeniyle sinyal hızının değişmesinden (yavaşlamasından) dolayı sinyal yolundaki fazla uzunluk (Propagation delay),

$$\int_a^b (n(s) - 1) \cdot dS$$

b. Elektromanyetik dalganın yörünge eğriliğinin değişmesinden (bending) dolayı sinyal yolundaki fazla uzunluk

$$\int_a^b dS - \int_a^c dG$$

şeklinde belirtilebilir. Bunlardan ikinci (b) durumundan dolayı oluşan hata düşük yükseklik (veri toplama) açıları dışında gözardı edilebilecek kadar küçüktür (Tablo-2.2), [7]. Dolayısıyla, bu çalışmada yalnızca esas etkiye sahip olan ortamın kırılma etkisinin var olduğu düşünülecektir.

Tablo 2.1. Uydu Yükseklik Açısı-Sinyal Eğilme Farkı İlişkisi

Uydu Yükseklik Açısı (cut-off angle, °)	Sinyal Eğilme Farkı (m)
2	0.417
5	0.075
10	0.019
20	0.005
45	0.001
90	0.000

Havanın kırılma indisi bir'den çok az farklı bir değere sahip olduğundan uygulamada kırılma daha çok

$$N = 10^{-6} \times (n-1) \quad (2.4)$$

ile ifade edilmektedir [35]. Bu eşitlikte N, kırıcılık (refractivity) olarak bilinmektedir. Buradan (2.4) ifadesi, (2.2)'de yerine konursa ve ikinci terim yukarıda belirtilen nedenden dolayı gözardı edilirse sinyal yolundaki fazlalık sonuç eşitlik olarak,

$$\Delta L = 10^{-6} \int_a^b N(s) ds \quad (2.5)$$

şeklinde yazılabilir.

Uydulardan yayınlanan elektromanyetik dalgaların (ya da ışık dalgaları) atmosferden geçerek alıcıya ulaştığı düşünülürse, söz konusu dalgaların yayılmasında iki temel atmosfer katmanının bozucu etkisi mevcut olup bunlar iyonosfer ve troposferdir.

Bu her iki katmanın uydu sinyalleri üzerindeki etkisi farklıdır ve (2.5) ifadesinin çözümü iyonosferik ve troposferik etkilerin belirlenmesinde temel düşünceyi oluşturmaktadır. Söz konusu katmanların elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkileri farklı olduğundan GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde bunların dikkate alınmasında farklı modellendirmeler ve yöntemler kullanılmaktadır.



BÖLÜM 3. İYONOSFER

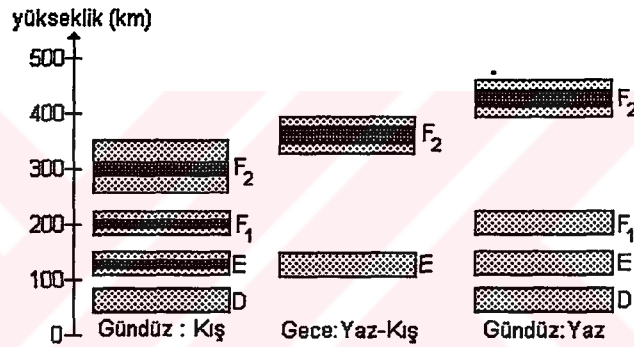
3.1. Genel

İyonosfer, hava moleküllerinin ileri derecede iyonlaşmış halde bulunduğu ve dolayısıyla elektrik iletkenliği kazandığı yüksek atmosfer bölgelerinin tümüdür. İyonosferde atomlardan kopmuş serbest elektronların sayısı, elektromanyetik dalgaların yayılmasını değiştirmeye yetecek kadar çoktur. İyonlaşma şiddeti, elektron yoğunluğu ile ifade edilmekte olup çok değişken olan bu yoğunluk cm^3 'de 100000 ile bir kaç milyon serbest elektron arasında değişir [3]. Dolayısıyla iyonosfer genel olarak, elektromanyetik dalgaların yayılmasını etkileyebilecek kadar serbest elektron yoğunluğuna sahip üst atmosfer tabakası (~70-3000 km.) olarak tanımlanabilir [5]. İyonlaşma ve serbest elektron sayısı genellikle doğrudan doğruya güneş ışımaya (radyasyon yoğunluğuna) bağlıdır. Buradan, iyonosferin elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkisinin geceye göre gündüz daha fazla olacağı sonucuna varılabilir.

İyonosfer bölgesinin ayrıntılı incelemesinde elektron dağılımı ile ifade edilen bir tabakalaşmanın varlığı ortaya çıkarılmıştır [8]. Bu tabakalar Şekil-3.1' de gösterilmektedir. Bunların yükseklikleri ile ilgili olarak verilen sınırlar kesin olmayıp farklı kaynaklarda farklı değerlerle ifade edilmektedir [8-10]. (D tabakası 50-90 km; E-tabakası 90-140 km; F_1 -tabakası 140-240 km; ve F_2 -tabakası 240-500 km olarak çok genel değerlerle ifade edilebilir). Şekil-3.1'den görüldüğü gibi söz konusu tabakalaşma, iyonosfer tabakasının 50 ile 500 km lik bölümünde oluşmaktadır. Bu tabakaların yükseklikleri kısa ve uzun süreli atmosferik değişimlere bağlıdır. Örneğin tüm tabakalar geceleyin gündüze göre daha incedir. Gece F_1 ve D tabakaları tamamen yok olmaktadır [11].

3.2. İyonosferik Gecikme Etkisi

İyonosferin elektromanyetik dalgaların yayılmasındaki etkisi Toplam Elektron Yoğunluğu (TEC) ile ifade edilmektedir. İyonosferik değişimi ifade eden TEC zamana ve konuma bağlı olarak değişim göstermektedir. TEC, uydu-alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca m^2 'deki toplam elektron sayısı (elektron/ m^2) olarak da ifade edilebilir [13]. TEC genel eğilimini belirlemek için birçok araştırma yapılmış olup günümüzde bu parametrelerin davranışı özellikle Türkiye'nin de içinde bulunduğu orta enlem bölgelerinde oldukça iyi bir şekilde bilinmektedir. Bununla birlikte gerek Ekvator'da ve gerekse yüksek enlem bölgelerinde bu bilgiler henüz tam değildir.



Şekil 3.1. İyonosfer Tabakaları

Genel olarak dünyanın büyük bölümünde TEC değeri yerel zamanla yaklaşık olarak saat 14:00 civarında maksimum günlük değere ulaşmaktadır [13]. Diğer taraftan TEC ile doğru orantılı olan iyonosferik etki yerel zamana göre gece yarısı ile sabah 05:00 saatleri arasında minimum değere ulaşmaktadır. Bu ise gündüz oluşan etkinin yaklaşık % 10-20 si kadardır [14]. Gece süresince olan ortalama iyonosferik etki 10 nano saniye (~ 3 m) , gündüz ise 50 nano saniye (~ 15 m) kadardır. Uydu alıcı arasındaki uzaklığa iyonosfer nedeniyle getirilecek olan düzeltme kışın ve ekinoks aylarında (Mart,Nisan,Eylül,Ekim) maksimum olup yaz aylarında ise minimum değere ulaşmaktadır [15]. Ayrıca, jeomanyetik konuma bağlı olarak ekvatorun ± 15 derece enlemlerinde TEC değeri maksimum değere ulaşmakta olup ekvatordaki iyonosferik etkiler orta enlem bölgelerine göre iki kat daha fazladır [13,14]. Bunların dışında gözlenen uydunun yüksekliğinin de iyonosferik etkinin büyüklüğü üzerinde etkisi vardır. Örneğin, düşük yükseklik açılarında iyonosferik etki gündüz ve gece için verilen değerlerin yaklaşık

üç katı kadardır. Yani gündüz 30 nano saniye, gece ise 150 nano saniyeye kadar çıkmaktadır [15].

İyonosferin GPS ölçülerinde neden olduğu sorunlar özellikle uydudan yayınlanan sinyallerin alıcı (receiver) tarafından alınması sırasındaki sinyal kesiklikleridir. Bu ise ölçülen taşıyıcı dalga fazının sürekliliğini engellediğinden faz kesikliklerine (Cycle Slips) neden olmaktadır. Bu da GPS ölçülerinin değerlendirilmesi (postprocessing) aşamasında oldukça yorucu ve zaman alıcı işlemler gerektirmektedir. Eğer ölçüler tek-frekanslı (single-frequency) alıcılar kullanarak yapılmışsa sorun daha da karmaşık hale gelmektedir. Dolayısıyla, yüksek doğruluk isteyen jeodezik ve jeodinamik amaçlı GPS ölçülerinde iyonosferik etkinin dikkate alınması daha büyük bir önem kazanmaktadır.

İyonosferin GPS ile yapılan kod ve faz ölçülerine olan etkileri farklıdır. Diğer bir ifadeyle kod ölçüleri için iyonosferik grup gecikme etkisi (group delay) söz konusu iken faz ölçüleri için faz hızlanması (phase advance) söz konusudur [5,16]. İyonosfer, radyo dalgalarını dağıtıcı (dispersive) bir özelliğe sahip olup bu bozucu etki radyo dalgalarının frekansına bağlı olarak değişim gösterir. Dolayısıyla bu etkiler modellendirilirken öncelikle iyonosferin kırılma indisinin belirlenmesi ve daha sonra da uydu-alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca integral alınarak ölçülere getirilecek olan düzeltmenin bulunması gerekmektedir.

Frekans ile iyonosferik kırılma indisi arasındaki ilişki,

$$n = 1 \pm \frac{A_1 \cdot N_e}{f^2} + (\text{Yüksek dereceden terimler}) \quad (3.1)$$

olarak verilmektedir [7]. Burada A_1 , birkaç fiziksel sabitenin basit bir kombinasyonu olup $A_1=40.3 \text{ m}^3 / \text{sn}^2$ olarak verilmektedir [15]. N_e , iyonosfer bölgesindeki serbest elektron yoğunluğunu (10^{16} elektron/ m^3 biriminde), f ise uydu sinyalinin frekansını (GHz) ifade etmektedir. (3.1) eşitliğinin sağındaki ikinci terim kod ölçüleri için (+), faz ölçüleri için ise (-) işaretini almaktadır. (-) işareti faz ölçüleri için kırılma indisinin gerçekte 1'den küçük olduğunu ve iyonosferden geçerken sinyal fazının hızının

arttığını ifade etmektedir. Şekil-2.2'den de görüleceği gibi ölçülen uydu-alıcı uzunluğunda iyonosferden dolayı bir azalma ya da fazlalık (ekses) söz konusudur. Bu artık uzunluk (S uydusu ile R alıcısı arasındaki) Δp_R^s ile gösterilirse,

$$\Delta p_R^s = \int_a^b (n - 1) dp_R^s \quad (3.2)$$

(3.1) eşitliği (3.2)'de yerine konursa sonuç olarak

$$\Delta p_R^s = \frac{A_1}{f^2} \int_a^b N_e dp_R^s \quad (3.3)$$

elde edilir [9].

Elektron yoğunluğunun uydu-alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca olan uzaklığa göre integrali Toplam Elektron Sayısı (TEC) olarak ifade edildiğinden buradan (3.3) ifadesi birinci dereceden bir eşitlikle,

$$\Delta p_R^s(Li) = \frac{A_1 \text{TEC}}{f^2(Li)} \quad (3.4)$$

halini alır. (3.4) eşitliğinde $A_1=40.3$ ve $Li=L1$ ve $L2$ frekanslarını ifade etmekte ve Δp_R^s değeri uzunluk biriminde elde edilmektedir. (3.4) eşitliği iyonosferik gecikme zamanı olarak da ;

$$\Delta t(Li) = \frac{\Delta p_R^s(Li)}{c} = \frac{40.3}{c \cdot f^2(Li)} \text{TEC} \quad (3.5)$$

c: boşluktaki ışık hızı,

ile verilmektedir [17,9]. (3.5)'den de görüleceği gibi iyonosferik etki TEC ile doğru orantılı ve sinyal frekansının karesi ile ters orantılıdır. Yine aynı

eşitlikten görüleceği gibi iyonosferik etki frekans bağımlıdır ve yüksek frekanslarda Δt değeri azalmaktadır. Bu frekans bağımlılığı nedeniyle çift-frekanslı alıcılar kullanarak iyonosferik etki büyük oranda giderilebilmektedir.

İyonosfer tabakası boyunca TEC, uydu zenit açısının ($z=90^\circ$ -yükseklik açısı) kosinüsü ile ters orantılı olarak,

$$TEC_i^J = \frac{VEC}{\cos z_i^J} \quad (3.6)$$

ile verilmektedir, (Şekil-3.2), [9]. Burada VEC, iyonosfer tabakasının düşey doğrultuda ($z_i^J=0$) sahip olduğu serbest elektron sayısıdır.

Dolayısıyla düşey doğrultudaki iyonosferik etki,

$$dV = \frac{40.3}{f^2(Li)} \cdot VEC \quad (3.7)$$

şeklinde yazılabilir [9]. Ancak, GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde sinyal doğrultusundaki etki dikkate alındığından (3.7) ifadesi daha açık olarak,

$$\Delta p_R^s(Li) = \frac{dV}{\cos z_i^J} = \frac{40.3}{f^2(Li)} \cdot \frac{VEC}{\cos z_i^J} \quad (3.8)$$

ile verilebilir. Burada $1/\cos z_i^J$ ifadesi indirgeme fonksiyonu (mapping function) olarak isimlendirilmektedir. (3.8)'deki VEC değeri enlemin ve güneşin saat açısı (HA)'nın bir fonksiyonu olarak (Taylor serilerine açılarak) hesaplanmakta olup ayrıntılı bilgi [8]'de bulunabilir.

L1 ve L2 frekanslarında kod (pseudorange) ölçüsü yapıldığında ölçülen pseudorange uzunluğu $p_R^s(Li)$, geometrik (toposentrik) uzunluk $d_R^s(Li)$ ile gösterilirse aralarındaki ilişki,

$$d_R^s(L1,L2) = \rho_R^s(L1,L2) + \Delta\rho_{R_{\text{ION}}}^s \quad (3.9)$$

ile belirli olup burada,

$$\Delta\rho_{R_{\text{ION}}}^s = c \cdot \Delta t(L1,L2) \quad (3.10)$$

dir [17]. (3.9)'dan görüleceği gibi iyonosferin sinyal hızındaki geciktirme (yavaşlatma) etkisinden dolayı ölçülen pseudorange uzunluğu geometrik uzunluktan daha büyüktür. (3.4) eşitliğinde $A_1=40.3 \cdot \text{TEC}$ kabul edilip bu da (3.9)'un ilk eşitliğinde yerine konursa ve $d_R^s(L1)=d_R^s(L2)$ kabul edilerek eşitlikler,

$$\rho_R^s(L1) + \frac{A_1}{f_1^2(L1)} = \rho_R^s(L2) + \frac{A_1}{f_2^2(L2)} \quad (3.11)$$

şeklinde yazılıp gerekli düzenlemeler yapıldığında A_1 katsayısı,

$$A_1 = \frac{f_1^2(L1) \cdot f_2^2(L2)}{f_1^2(L1) - f_2^2(L2)} \cdot (\rho_R^s(L1) - \rho_R^s(L2)) \quad (3.12)$$

ile elde edilir. (3.12) eşitliği (3.4) yardımıyla (3.9) eşitliğinde yerine konursa sonuç olarak L3 (iyonosferden bağımsız kombinasyon) frekansı ile

$$\rho_R^s(L3) = \frac{f_1^2(L1)}{f_1^2(L1) - f_2^2(L2)} \rho_R^s(L1) - \frac{f_2^2(L2)}{f_1^2(L1) - f_2^2(L2)} \rho_R^s(L2) \quad (3.13)$$

şeklinde elde edilmektedir [13]. Daha kullanışlı bir eşitlik olarak (3.13) ifadesi

$$\rho_R^s(L3) = k_1 \cdot \rho_R^s(L1) - k_2 \cdot \rho_R^s(L2) \quad (3.14)$$

$$k_1 = \frac{f_1^2(L1)}{f_1^2(L1) - f_2^2(L2)} = 2.545728, \quad k_2 = \frac{f_2^2(L2)}{f_1^2(L1) - f_2^2(L2)} = 1.545728$$

ile verilmektedir [17].

Yukarıda verilen eşitlikler aynı yaklaşımla faz ölçüleri için [5]'de çıkarılmıştır. Bilindiği gibi iyonosferik etki faz ölçülerinin hızlanmasına neden olmaktadır. Bu durumda ise ölçülen uzunluk gerçek uzunluktan daha kısa olacaktır. Böylece faz ölçüleri için iyonosferden bağımsız L3 lineer kombinasyonu için,

$$\Phi_R^s(L3) = k_1 \cdot \Phi_R^s(L1) + k_2 \cdot \Phi_R^s(L2) \quad (3.15)$$

yazılabilir. Bu eşitliğin en önemli sakıncası taşıyıcı dalga faz başlangıç belirsizliklerinin (Initial Phase Ambiguity) tam sayı olma özelliklerinin k_1 ve k_2 çarpanları nedeniyle yok olmasıdır. Bu faz başlangıç belirsizliklerinin bilinmemesi nedeniyle iyonosferik faz düzeltmeleri doğrudan hesaplanamamakta, bu amaç için çift frekanslı pseudorange ölçülerinden yararlanılmaktadır [17].

(3.9)-(3.14) eşitlikleri çift frekanslı alıcılar için geçerli olup, eğer tek frekanslı alıcılar söz konusu ise ya da tek frekansta ölçü yapılmışsa bu durumda iyonosferik düzeltme katsayıları ($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$), ya [5] ve [13]'de verilen iyonosferik modeller kullanarak hesaplanır veya uydu mesajlarının bir bölümü olarak yayınlanan değerlerden yararlanılarak doğrudan elde edilir. Uydu mesajlarının bir bölümü olarak yayınlanan mevsimlik iyonosferik model katsayıları Tablo-3.1'de verilmektedir. Buradaki değerler güneş radyasyon aktivitesinin (Solar flux activity) en az olduğu zamanlara aittir. Ancak, söz konusu modellerden yararlanılan katsayılarla orta enlem kuşaklarındaki iyonosferik etkinin ancak yaklaşık % 50'si giderilebilmektedir [13]. Dolayısıyla yüksek duyarlılık isteyen çalışmalarda ve özellikle uzun bazlarda çift

frekanslı aletlerin kullanılması ve değerlendirilmelerin ise L3 kombinasyonu kullanılarak yapılması daha uygundur.

Tablo 3.1. İyonosferik Model Katsayıları ve Değerleri

Katsayı	Birimi	Kış	İlkbahar	Yaz	Sonbahar
α_0	Sec	7.9E-9	9.2E-9	4.3E-9	1.2E-8
α_1	sec/SC	-8.9E-9	1.8E-8	1.2E-8	-2.3E-9
α_2	sec/SC ²	-6.2E-8	-7.2E-8	-3.4E-8	-9.2E-8
α_3	sec/SC ³	7.0E-8	-1.2E-7	-8.8E-8	2.1E-8
β_0	Sec	8.8E+4	8.7E+4	8.0E+4	9.3E+4
β_1	sec/SC	-2.7E+4	5.0E+4	6.3E+4	-1.5E+3
β_2	sec/SC ²	-1.7E+5	-1.6E+5	-8.3E+4	-2.2E+5
β_3	sec/SC ³	1.9E+5	-3.3E+5	-4.1E+5	1.5E+4
sec = saniye, SC = semicircles (1 SC = 180 derece), E = üslü sayı					

Birbirine yakın uzaklıkta ölçü yapan iki alıcı için iyonosferik etki aynı kabul edilebilir. Çünkü, elektromanyetik dalgalar aynı iyonosferik bölgeden geçtiğinden aynı büyüklükteki etkiye maruzdurlar. Bu nedenle kısa baz uzunluklarında (<20-30 km) [18]'de ayrıntılı olarak verilen tekli, ikili ve üçlü faz farkları oluşturularak söz konusu iyonosferik etki hem tek hem de çift frekanslı ölçüler için büyük ölçüde giderilebilmektedir. Ancak, uzun bazlarda (>100 km) mutlaka çift frekanslı alıcılar kullanılmalıdır. Ayrıca, kısa bazların değerlendirilmesinde yalnızca L1 frekansının bir iyonosfer model ile birlikte kullanılması L3 kombinasyonuna göre çoğu zaman daha iyi sonuç vermektedir. Çünkü, L3 kombinasyonunun gürültüsü (noise) L1'e göre daha fazladır. (3.15) eşitliği dikkate alınır, burada σ_R^s (L1) ve σ_R^s (L2)'nin aynı standart sapmaya (σ_0) sahip olduğu kabul edilirse bu durumda σ_R^s (L3) için standart sapma, hata yayılma yasasından yararlanarak,

$$\sigma^2(L3) = k_1^2 \cdot \sigma_0^2 + k_2^2 \cdot \sigma_0^2 \quad (3.16a)$$

$$\sigma(L3) = \sqrt{k_1^2 + k_2^2} \cdot \sigma_0 \quad (3.16b)$$

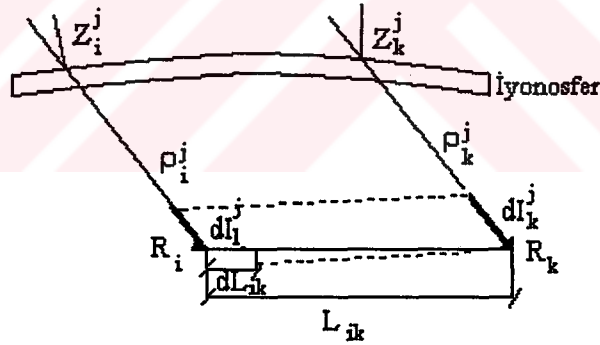
olarak elde edilir. Burada k_1 ve k_2 katsayıları (3.16a)'da yerine konursa,

$$\sigma(L3) \approx 3. \sigma_0 \quad (3.17)$$

elde edilir. (3.17)'den de görüleceği gibi L3 lineer kombinasyonunun standart sapması L1 frekansının yaklaşık üç katı kadardır. Bunun anlamı ise küçük baz uzunluklarında L3 kombinasyonu ile çözüm her zaman en uygun sonucu vermemektedir.

3.3. Görelî İyonosferik Etki

GPS ile iki temel konumlama yöntemi mevcut olup bunlar mutlak (nokta konumlama) ve görelî konumlama [19]. Bilindiği gibi yüksek doğruluk istenen çalışmalarda görelî konumlama ile faz ölçüleri kullanılmaktadır. Görelî konumlama kullanılması durumunda görelî iyonosferik etki söz konusu olup (3.8) eşitliği ve şekil-3.2' den i ve k noktalarındaki iyonosferik etkiler sırasıyla



Şekil 3.2. Homojen Bir İyonosfer Tabakasında Görelî Etki

$$dl_i^j = \frac{dV}{\cos z_i^j} \quad (3.18a)$$

ve

$$dl_k^j = \frac{dV}{\cos z_k^j} \quad (3.18b)$$

yazılırsa sonuçta görelî iyonosferik etki,

$$dl_{ik}^J = dl_k^J - dl_i^J = dV \left(\frac{1}{\cos z_k^J} - \frac{1}{\cos z_i^J} \right) \quad (3.19)$$

ile hesaplanmaktadır [9]. Şekil-3.2'de, $z_k^J > z_i^J$ olduğundan dl_{ik}^J değerinin daima pozitif olacağı açıktır. Daha önceden de belirtildiği gibi iyonosferik etki nedeniyle uydu-alıcı uzaklığı olması gerekenden daha kısadır. Yine şekil-3.2'den görüleceği gibi k noktasının zenit açısı i noktasına göre daha büyük olduğundan (3.18) ve (3.19) eşitliklerinden dolayı k noktasındaki iyonosferik etki daha büyük olacaktır. İyonosferik etkinin dikkate alınmaması durumunda p_{ik}^J uydu-alıcı uzaklığı p_i^J uzaklığına göre daha fazla kısılacaktır. Bu ise ölçülmek istenen L_{ik} bazında bir kısalmaya neden olacaktır. Sonuç olarak görelî konumlama yönteminde söz konusu olan görelî iyonosferik etki ölçülmek istenen bazda daima bir kısalmaya neden olacaktır. Bu kısalma miktarı ise şekil-3.2'den yararlanarak,

$$dL_{ik} = dl_{ik}^J \cdot \cos E^J \quad (3.20)$$

ile hesaplanır [9]. (3.20) eşitliğinde E^J açısı i ve k noktalarında uydulara olan yükseklik açılarının ortalamasıdır. (3.19) eşitliğinin uygulamaya yönelik olan daha açık ifadesi [9]'da verilmekte olup bu formülden yararlanarak, düşey doğrultudaki 1 m'lik bir iyonosferik gecikme için uydu yükseklik açısıyla dl_{ik}^J görelî iyonosferik etki arasındaki ilişki Şekil-3.3' de görülmektedir.

(3.20) ile verilen görelî iyonosferik etkinin GPS bazlarındaki sonuçları başka araştırmacılar tarafından da incelenmiştir. Bu araştırmacılar tarafından verilen bağıntılar önemli ölçüde farklılık gösterse de bu modeller kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucu yaklaşık aynı büyüklükte değerler elde edilmektedir. Örneğin, [20]'de basit geometrik yaklaşımlar kullanılarak $Z_{\max} \leq 70^\circ$ için aşağıdaki sonuç eşitlik verilmektedir.

$$\frac{\Delta \ell}{\ell} = -41 \cdot \frac{VEC}{f_i^2} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{\cos Z_{MAX}} \quad (3.21)$$

$$l = L1, L2$$

Burada,

l , baz uzunluğu

Δl , baz uzunluğundaki hata miktarı

VEC, (sabit) elektron yoğunluğu

f_i , gözlenen taşıyıcının frekansı

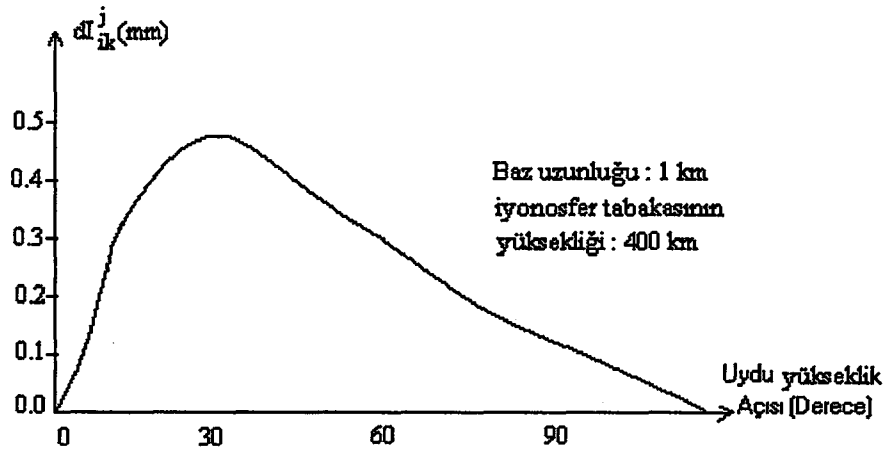
R , yeryuvarının yarıçapı

Z_{max} , gözlenen maksimum zenit mesafesidir.

(3.21) eşitliği L1 frekansı ($f_{L1} = 1.57542 \times 10^9$ Hz) için yazılırsa ($R = 6371$ km), $\Delta l/l$ ölçek faktörü sonuç olarak

$$\Delta l/l = -0.7 \times 10^{-17} VEC \text{ (mm/km)} \quad (3.22)$$

şeklinde elde edilir. Dolayısıyla, VEC değeri $VEC \approx 0.5 \times 10^{17}$ (gece) ile $VEC \approx 5 \times 10^{17}$ (gündüz) değerleri arasında değiştiğinden L1 gözlemleri için iyonosferden dolayı oluşacak ölçek hatası $\Delta l/l \approx 0.35$ ppm ile $\Delta l/l \approx 3.5$ ppm arasında olacaktır.



Şekil-3.3. Görelî iyonosferik etki-uydu yükseklik açısı ilişkisi

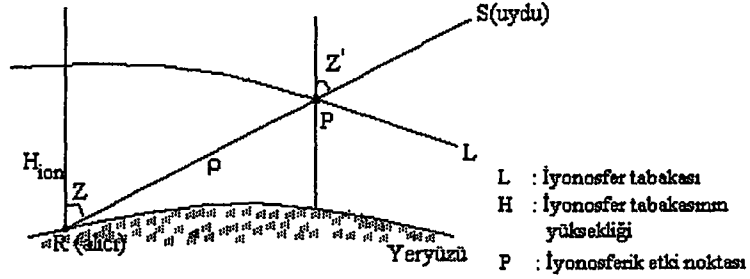
Eğer proje alanında (10-30 km) bir tane çift frekanslı alıcı varsa ve diğer alıcılar tek frekanslı ise söz konusu ölçek hatası büyük ölçüde giderilebilir. Burada, çift frekanslı alıcı ile elde edilen ölçülerden yararlanarak iyonosferik model oluşturulur ve bu model tek frekanslı alıcılardan elde edilen ölçülere uygulanır. Ancak daha büyük ağlarda (>100 km) daha fazla sayıda çift frekanslı alıcıya gereksinim vardır.

Diğer taraftan çift-frekanslı alıcılara göre çok ucuz olmaları nedeniyle gelecekte tek-frekanslı alıcıların ülkemizde de pratik jeodezik amaçlı olarak yaygın bir şekilde kullanılacağı düşünülmektedir. Bu durumda, Türkiye'de belirli bölgelerde çift-frekanslı alıcılar ile sürekli gözlem yapan sabit istasyonlar oluşturulabilir (örneğin, Ankara'da Harita Genel Komutanlığı tarafından 1991 yılında tesis edilmiş olan bir sabit istasyon bulunmaktadır). Böylece bu sabit istasyonlarda hesaplanan iyonosfer modeli parametreleri gerek proje alanındaki tek frekanslı alıcılarda gerekse bu sabit istasyonlarda bulunan özel amaçlı telsizlerle, örneğin sabit nokta/noktalar ile diğer noktalar arasındaki düzeltmeleri (sinyal, iyonosfer, troposfer vb.) gönderme ve alma işlemlerinde uluslararası bir standart olan RTCM SC-104 (Radio Technical for Maritime Special Committee 104) [30] formatında yayınlanarak söz konusu tek-frekanslı alıcılar kullanılarak elde edilen ölçülere iyonosferik düzeltme getirme olanağı süratli bir şekilde sağlanmış olacaktır. Böylece, uzun kenarlı ağların söz konusu olması durumunda bile tek frekanslı alıcılar kullanılarak yüksek doğruluklu sonuçlar elde etmek olanaklı olabilecektir.

3.3. Sayısal Uygulama

GPS faz ölçüleri ile göreceli konumlama yönteminde dikkate alınmayan iyonosferik etkinin kısa ve uzun bazlardaki etkisini araştırmak için bir uygulama yapılmıştır. Bu uygulama için 1990 ve 1991 yıllarında Türkiye'de yapılmış olan GPS ölçülerinden yararlanılmıştır. Uzun bazlara örnek olarak 1991 yılında Türkiye'deki üç SLR noktasında (Yığılca/BOLU, Melengiçlik/KARAMAN, Yozgat) yapılmış olan GPS ölçüleri, kısa bazlara örnek olarak ise 1990 yılında Ankara GPS Test Ağı (AGTA)'nda yapılmış olan GPS ölçülerinden yararlanılmıştır. Bu ölçülerle ilgili ayrıntılı bilgi [12] ve [21]'de verilmektedir.

Söz konusu GPS ölçülerinin değerlendirilmesi ise Harita Genel Komutanlığı'nda mevcut Bernese Version 3.3 (VAX 11/780 sisteminde) yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Bu yazılımda kullanılan iyonosferik düzeltme için gerekli parametrelerin hesabında fonksiyonel model olarak tek tabaka (single layer) modeli kullanılmaktadır (Şekil-3.4).



Şekil-3.4. Tek tabaka (single layer) modeli

Bu modelde kullanılan iyonosferik düzeltme faz ölçüleri için,

$$\Delta\Phi_{R_{ION}}^S = -\frac{41}{f_{L1,2}^2} \cdot \frac{VEC}{\cos z'} \quad (3.23)$$

ile verilmektedir [22]. (3.23) eşitliğindeki VEC değeri P noktasındaki elektron yoğunluğunu ifade etmekte olup gece ölçüleri için (20:00-08:00) sabit ve bunun da $10 \times 10^{16} \leq VEC \leq 20 \times 10^{16}$ değerleri arasında olduğu kabul edilmektedir [23]. Aynı eşitlikteki z' ise uydu sinyalinin iyonosfer tabakasını kestiği P noktasından uyduya olan zenit uzaklığı olup bu da

$$\sin z' = \frac{R_e}{R_e + H_{ION}} \cdot \sin z \quad (3.24)$$

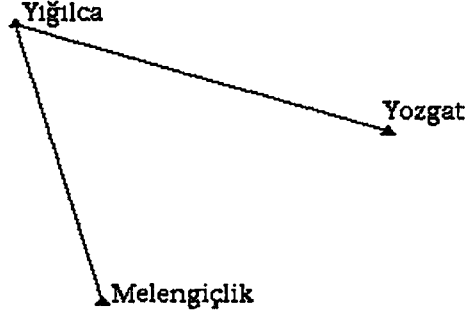
ile verilmektedir [21]. Bu eşitlikte,

R_e = yeryuvarının yarıçapı,

H_{ion} = iyonosfer tabakasının yüksekliği (350 km),

z = alıcıdan uyduya olan zenit uzaklığıdır.

Uzun bazlara örnek olarak seçilen üç SLR noktasındaki GPS faz gözlemlerinden yararlanarak Yığılca-Melengiçlik ve Yığılca-Yozgat bazları oluşturulmuş (Şekil-3.5),



Şekil-3.5. SLR noktaları GPS bazları

değerlendirmelerde Yığılca noktasının ITRF89 (International Terrestrial Reference Frame-1989) koordinatları sabit olarak alınmıştır. Söz konusu üç SLR noktasında, WEGENER-MEDLAS projesi kapsamında periyodik SLR ölçüleri 1987 yılından bu yana yapılmakta olup bu noktaların ITRF89 koordinatlarının hesaplanması ile ilgili ayrıntılı bilgi [24]'de verilmektedir. Dolayısıyla, bu uygulamada üç SLR noktasında yapılan eşzamanlı GPS gözlemlerinin değerlendirilmesi ile elde edilen bazlar, yine aynı noktaların ITRF89 sisteminde ve GPS'den daha duyarlı olarak belirlendiği umulan SLR koordinatlarından hesaplanan bazlarla karşılaştırılmıştır. GPS gözlemlerinin değerlendirilmesinde;

- Sabit nokta koordinatı olarak Yığılca (SLR) noktasının ITRF89 koordinatları alınmış,
- Yörünge bilgisi olarak Duyarlı (Precise) Efemeris kullanılmış,
- Bazların uzun olması nedeniyle faz başlangıç belirsizlikleri tamsayıya dönüştürülmeyip kesirli değerli (real-valued) olarak EKK dengelemesi ile nokta koordinatlarıyla birlikte hesaplanmış,
- Olası sinyal yansıma (multipath) etkisini en aza indirmek için minimum uydu yüksekliği 20 derece olarak alınmış,

- Troposferik parametreler Ek-A'da verilen (A.1) eşitliği ile her nokta için bir tane hesaplanmış,

- Her baz için L1 ve L2 frekanslarındaki faz ölçülerinden yararlanarak iyonosfer modeli katsayıları (3.23) eşitliği ile hesaplanmış, ve

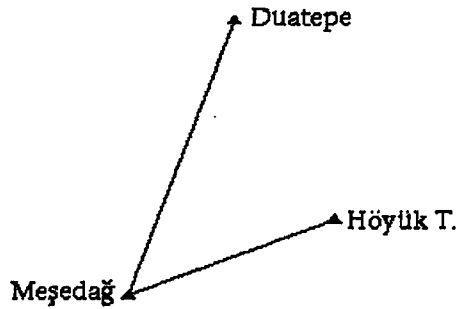
- Değerlendirmelerde L1, L1+L2 frekansları ve L3 lineer kombinasyonu kullanılmıştır.

Uzun bazlara ilişkin gözlem bilgileri Tablo-3.2' de, değerlendirme sonuçları ve bunların SLR bazları ile karşılaştırılmaları ise Tablo-3.3'de verilmektedir.

Tablo 3.2. 1991 yılı SLR noktaları GPS gözlem bilgileri

BAZ ADI	ÖLÇÜ BAŞLAMA	ÖLÇÜ BİTİŞ	İZLENEN UYDULAR (PRN)
	YY MM DD HH:HH	YY MM DD HH:HH	
Yığılca-Yozgat	91 09 07 06:06	91 09 07 17:20	20,3,12,24,16,17 23,21,11,15,14
Yığılca-Melengiçlik	91 09 07 06:06	91 09 07 17:20	20,3,12,24,16,17 23,21,11,15,14

Kısa bazlara örnek olarak Ankara GPS Test Ağı'nda yaklaşık 6 ve 20 km'lik iki baz seçilmiş olup bunlar Meşedağ-Höyük ve Meşedağ-Duatepe bazlarıdır (Şekil-3.6).



Şekil-3.6. AGTA GPS bazları

Tablo-3.3. Uzun bazlar değerlendirme sonuçları

BAZ ADI	DEĞERLENDİRME STRATEJİSİ		GPS BAZI	STANDART SAPMASI	SLR BAZI
	Frekans	İyonosfer Modeli	(m)	(mm)	(m)
Yığılca - Yozgat	L1	Yok	313137.2415	12.8	313137.4939
	L1	Var	313137.6413	14.4	
	L1+L2	Var	313137.6958	13.9	
	L3	—	313137.4720	1.2	
Yığılca - Melengiçlik	L1	Yok	423156.6739	11.9	423156.9934
	L1	Var	423156.9729	11.6	
	L1+L2	Var	423156.9701	11.3	
	L3	—	423156.9808	0.8	

Bu bazların değerlendirilmesinde ;

- Sabit nokta olarak Meşedağ noktası alınmış olup bu noktanın ITRF89 koordinatları Alman Uygulamalı Jeodezi Enstitüsü (IfAG) ile birlikte yürütülen GPS çalışmaları kapsamında (1990) hesaplanmıştır [12],

- Yörünge bilgisi olarak Duyarlı (Precise) Efemeris kullanılmış,

- Bazların kısa olması nedeniyle faz başlangıç belirsizliklerinin yaklaşık olarak tamamı çözülmüş,

- Olası sinyal yansıma (multipath) etkisini en aza indirmek için minimum uydu yüksekliği 20 derece olarak alınmış,

- Her bir baz için L1 ve L2 frekanslarındaki faz ölçülerinden yararlanarak iyonosfer modeli katsayıları (3.23) ile hesaplanmış,

- Troposferik zenit gecikme düzeltmesi (A.1) eşitliği ile her nokta için bir tane hesaplanmış,

- Değerlendirmelerde L1, L1+L2 frekansları ve L3 lineer kombinasyonu kullanılmıştır.

Bu baz çözümleri ise yine aynı noktalarda 1991 yılında yapılmış olan EDM (Rangemaster III) ölçü sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Rangemaster III EDM aleti ile ölçülen kenarlarla ağ dengelendiğinde, aletin duyarlılığının $m_s = 6 \text{ mm} + 1.5 \text{ ppm}$ olduğu saptanmıştır. Buna göre 20 km uzunluğundaki bir bazın $\pm 3.6 \text{ cm}$ hata ile ölçülmesi beklenebilir [25].

Kısa bazlara ilişkin ölçü bilgileri Tablo-3.4'de, değerlendirme sonuçları ve bunların EDM ölçüleri ile karşılaştırılmaları ise Tablo-3.5'de verilmektedir.

Tablo.3.4. 1990 yılı AGTA noktaları GPS gözlem bilgileri

BAZ ADI	ÖLÇÜ BAŞLAMA YY MM DD HH:HH	ÖLÇÜ BİTİŞ YY MM DD HH:HH	İZLENEN UYDULAR (PRN)
Meşedağ- Höyük T.	90 08 20 01:10	90 08 20 08:00	2,3,6,11,12,13, 16,18,20
Meşedağ- Duatetepe	90 08 20 01:20	90 08 20 08:03	2,3,6,12,13,16, 18,20

Değerlendirmelerde, sonucu etkileyebilecek sistematik sapmalar (Troposferik etki, multipath vb.) olabildiğince giderilmeye çalışılmış, özellikle kısa bazlarda faz başlangıç belirsizliklerinin tamamına yakını çözülmüştür. Dolayısıyla, gerek uzun ve gerekse kısa bazların değerlendirilmesinde yalnızca iyonosferin temel etken olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım göz önüne alınarak değerlendirme sonuçları karşılaştırıldığında, eğer çift frekanslı alıcılar kullanılmışsa, kısa bazlarda L1+L2 frekanslarında iyonosferik model kullanılarak yapılan; uzun bazlarda ise L3 (iyonosferden bağımsız) kombinasyonu kullanılarak yapılan çözümün en uygun olduğu görülmektedir. Eğer, tek-frekanslı alıcılarla ölçü yapılmışsa bu durumda L1 frekansı ve iyonosfer modeli kullanılarak çözüm elde edilmelidir.

Tablo-3.5. Kısa bazlar değerlendirme sonuçları

BAZ ADI	DEĞERLENDİRME STRATEJİSİ		GPS BAZI	STANDART SAPMASI	EDM BAZI
	Frekans	İyonosfer Modeli	(m)	(mm)	(m)
Meşedağ - Höyük	L1	Yok	5814.0544	0.8	5814.065
	L1	Var	5814.0690	0.7	
	L1+L2	Var	5814.0714	0.7	
	L3	—	5814.0620	1.7	
Meşedağ - Duatpe	L1	Yok	19522.4020	4.7	19522.455
	L1	Var	19522.4369	4.7	
	L1+L2	Var	19522.4414	3.7	
	L3	—	19522.4294	4.0	

Tablo-3.3'den görüleceği gibi iyonosfer model kullanılmadan yalnızca L1 frekansında yapılan çözümler uzun bazlarda oldukça farklı sonuçlar vermektedir. Diğer taraftan, kısa bazlarda elde edilen çözümler arasındaki fark daha küçüktür. Çünkü, kısa bazlarda bazın her iki noktasına ulaşan sinyaller aynı iyonosfer bölgesinden geçtiğinden aynı etkiye maruz kalacaklardır. Böylece, faz farkı ve görel konumlama yöntemi ile bu hata kaynağı büyük ölçüde giderilebilmektedir.

Ayrıca Tablo-3.2 ve 3.3'den görüleceği gibi ölçüler uzun süreli olarak yapılmıştır. Dolayısıyla, çözümler arasındaki fark özellikle kısa baz uzunluklarında fazla değildir. Bunun en büyük nedeni olarak iyonosferin düzensiz olan etkisinin uzun gözlem sürelerinde ortalama bir değere gelmesi olduğu ve böylece esas etkiyi sistematik kısmın oluşturduğu düşünülmektedir. Bu sistematik etki ise uygun yöntem ve modellendirmeler ile büyük ölçüde giderilebilmektedir.

GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde iyonosfer modelinin kullanılması, güneş leke hareketlerinin (sunspot activity) arttığı dönemlerde özellikle önem kazanmaktadır. Örneğin, 1983-1986 yılları arasında güneş leke hareketleri en az seviyede olup 1987 yılından itibaren artan bir sürece girmiştir [26] ve 1989 yılında maksimum değere ulaşmıştır. Söz konusu leke hareketleri ile ilgili ayrıntılı bilgi [27]'de verilmektedir. Güneş leke hareketlerinin maksimum

olduğu dönemlerde yapılan GPS faz gözlemlerinin öndeğerlendirilmesinde önemli sorunlarla karşılaşılacağı düşünülmektedir. Çünkü, bu hareketlerin artması, atmosferdeki serbest elektron sayısını artıracaktır. Bu ise özellikle tek-frekansta yapılan ölçülerde daha fazla ölçek hatasına neden olacaktır. Aynı zamanda, iyonosferik etkinin kısa süreli düzensiz değışimleri de artacaktır. Bu da deneyim isteyen yorucu bir öndeğerlendirme işlemi gerektirecektir.

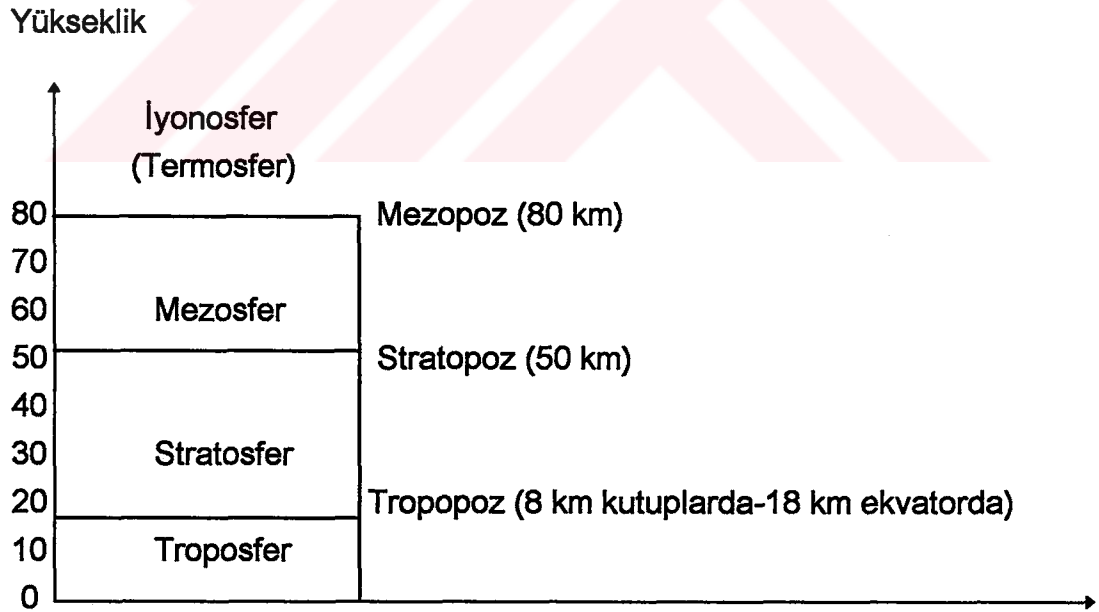


BÖLÜM 4. TROPOSFER

4.1. Genel

GPS uydularından yayınlanan sinyaller atmosfere girmeden önce uzaydaki boşlukta ilerlerler. Bu sinyaller atmosfere girdiğinde içinden geçtikleri ilk tabaka iyonosferdir. Bölüm-3'de açıklandığı gibi GPS sinyallerinin iyonosferdeki ilerleme hızı sinyal frekansına bağlıdır. Dolayısıyla, iyonosfer tabakasının GPS sinyallerine olan etkileri çift frekanslı alıcılar kullanılarak büyük ölçüde giderilebilmektedir.

İyonosfer tabakasından geçen sinyaller sırasıyla mezosfer, stratosfer ve troposfer tabakalarından ilerlerler (Şekil 4.1).



Şekil-4.1. Yer Atmosferinin Yapısı

Troposfer, havanın yeryüzü ile temas halinde olan en alt tabakasıdır. Kalınlığı, yeryüzünden itibaren 6-18 km kadardır. Bu kalınlık kutuplarda daha az, ekvatorlarda ise daha fazladır. Hava olayları genel olarak troposferin 3-4 km lik alt kısımlarında görülmektedir. Bunun daha üstündeki kısımda, havada nem oranı çok az olduğundan atmosfer olayları pek görülmez.

İyonosfer atmosferin elektrik yüklü (iyonize olmuş) kısmını oluşturduğundan bu tabaka radyo frekanslarında dağıtıcı (dispersive) bir özelliğe sahiptir. Oysa (Şekil 4.1)'de belirtilen stratosfer ve troposfer tabakaları elektrik yüklü olmadığından (iyonize olmamış; nötr) yaklaşık 30 GHz'in altındaki radyo frekansları için dağıtıcı özelliğe sahip değildir [21]. Dolayısıyla, sözkonusu tabakalarda, radyo dalgalarının yayılması frekans bağımlı değildir. Bu nedenle, troposferin faz ve kod ölçülerine olan etkileri aynı büyüklüktedir ve GPS alıcılarının çift frekans özelliğinden yararlanarak gidermek olanaklı değildir. İyonosferik etki GPS gözlemlerinden yararlanarak doğrudan hesaplanabilmektedir, troposferik etkiyi ise bu şekilde elde etmek olanaklı olmadığından mevcut modellerden biri kullanılarak bu etki hesaplanmalı ya da doğrudan ölçülmelidir.

Troposferik etki günümüzde kullanılan GPS (Global Positioning System), 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 etkilere biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

4.2. Troposferik Gecikme Etkisi

Nötr (iyonize olmamış) atmosferin radyo frekanslarında yayınlanan elektromanyetik dalgalara olan etkisi troposferik gecikme etkisi (ya da troposferik refraksiyon) olarak isimlendirilmektedir [38].

Gerçekte stratosfer tabakası da nötr atmosferin bir parçasıdır. Ancak, troposfer nötr atmosferin büyük bölümünü (% 90) oluşturduğundan ve uygulamada su buharının hemen tamamının bu tabakada yer aldığı kabul edildiğinden, nötr atmosferin elektromanyetik dalgalara olan etkisi de kısaca troposferik etki olarak ifade edilmektedir [32, 33].

Nötr atmosfer elektromanyetik dalgaların hızını ve yönünü değiştirir. Bölüm 1'de açıklandığı gibi bu etki elektromanyetik dalganın yavaşlamasına ve bir miktar da eğilmesine neden olur. Her iki etkinin neden olduğu gecikme uydu-alıcı arasındaki uzaklık boyunca mevcut ortam kırılma indisinin (n) değişimine bağlıdır.

Bu gecikme miktarı ise S sinyal yolu boyunca (2.3) eşitliğinden yararlanarak

$$\Delta S_{\text{trop}} = \int_a^b (n-1) dS + (S-G) \quad (4.1)$$

ile ifade edilebilir [34]. Zenit doğrultusundaki gözlemlerde (4.1) eşitliğinde $S=G$ olacağı açıktır. Elektromanyetik dalganın eğilmesinden dolayı gelecek etkiyi ifade eden $(S-G)$ terimi Bölüm(2.2)'de anlatılan nedenlerle göz ardı edilirse, problem (4.1) eşitliğindeki integralin alınması haline dönüşecektir. Böylece troposferik gecikme etkisi,

$$\Delta S_{\text{trop}} = \int_a^b (n-1) dS \quad (4.2)$$

ile ifade edilebilir. (4.2) eşitliğindeki kırılma indisi yerine genellikle (2.4)'de verilen kırıcılık N kullanılmaktadır.

$$N = (n-1) \times 10^6 \quad (4.3)$$

(4.3)'den yararlanarak (4.2) eşitliği

$$\Delta S_{\text{trop}} = 10^{-6} \int_a^b N(s) dS \quad (4.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada atmosferik kırılma $N(s)$, ısı, basınç ve su buharının bir fonksiyonu olarak

$$N(s) = k_1 \cdot \frac{P_d}{T} + k_2 \cdot \frac{e}{T} + k_3 \cdot \frac{e}{T^2} \quad (4.5)$$

olarak verilmektedir [35]. Bununla ilgili daha duyarlı eşitlik [36]'da verilmektedir. (4.5) ifadesinde P_d , kuru havanın toplam atmosferik basıncını (mbar), e ; su buharının kısmi basıncını (mbar), T atmosferik sıcaklığı (Kelvin) ifade etmektedir. k_1 , k_2 ve k_3 katsayıları ise [35] ve [36]'da verilen değerlere göre Tablo-4.1'de gösterilmektedir. Bu tablodaki K , Kelvin'i ifade etmektedir.

Tablo-4.1. k_1 , k_2 ve k_3 için deneysel olarak belirlenmiş değerler

	Smith ve Weintraub (1953)	Thayer (1974)
k_1 (K/mbar)	77.610±0.010	77.604±0.014
k_2 (K/mbar)	71.600±9	64.790±0.080
k_3 (K ² /mbar)	(3.747±0.03)×10 ⁵	(3.776±0.004)×10 ⁵

(4.5) eşitliğinin doğruluk derecesi normal atmosferik koşullarda yaklaşık %0.5 olarak verilmektedir [37]. Atmosfer, iki ideal gazın bir karışımı (kuru hava ve su buharı) olarak düşünülürse (4.5) eşitliği

$$N = N_d(s) + N_w(s) \quad (4.6a)$$

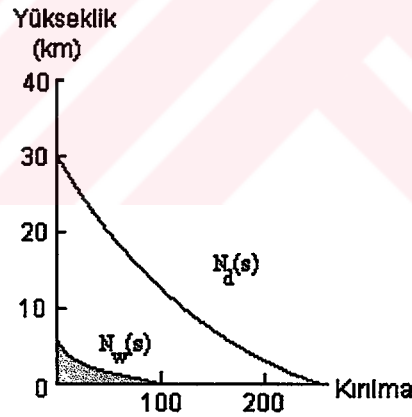
$$N_d(s) = 77.6 (P/T) \quad (4.6b)$$

$$N_w(s) = 3.73 \times 10^5 (e/T^2) \quad (4.6c)$$

olarak iki ana bileşenle ifade edilebilir, [35-40]. Bunlardan $N_d(s)$ kuru bileşen, $N_w(s)$ ise ıslak bileşen olarak adlandırılmaktadır. Ancak $N_d(s)$ ifadesinin kuru bileşen olarak isimlendirilmesi gerçekte doğru değildir.

Çünkü, bu bileşene esas etki her ne kadar kuru havadan gelmekteyse de su buharından gelen etki de gözardı edilemeyecek kadar önemlidir. Bu nedenle $N_d(s)$ ifadesine [41] ve [42]'de hidrostatik gecikme (bileşen) adı da verilmektedir. $N_w(s)$ bileşeni ise tamamen atmosferik su buharı dağılımının bir fonksiyonudur.

Troposferik gecikmenin (kırılmanın) yaklaşık %90'ı kuru bileşen ve geri kalan %10'luk kısmı ise ıslak bileşenden oluşmaktadır [17, 33, 39, 43]. Yerel zenit doğrultusundaki kuru bileşen, hidrostatik denge ve ideal gaz kanununa uyduğu kabul edilerek, yalnızca basınç ölçü değeri kullanılarak yeterli doğrulukta belirlenebilmektedir [38, 39]. Ancak aynı durum ıslak bileşen için sözkonusu değildir. Çünkü, atmosferdeki su buharı dağılımı yeterli doğrulukta belirlenememektedir. Su buharı basıncı dağılımı çok değişken olup bu değişimler kuru bileşene göre yaklaşık üç kat daha fazladır [44]. Radyo sondaj verileri yardımıyla $N_d(s)$ ve $N_w(s)$ için elde edilen yükseklik profili (Şekil-4.2)'de gösterilmektedir [31].



Şekil-4.2. $N_d(s)$ ve $N_w(s)$ için yükseklik profili.

Şekil 4.2'den de görüleceği gibi ,

- * $N_d(s)$ 'nin troposferdeki değişimi çok küçüktür,
- * $N_d(s)$, 40 km ve daha yukarı yüksekliklerde gözardı edilebilir.
- * $N_w(s)$ ise yalnızca yere yakın yükseklikler (0-5 km) için önemlidir.

Dolayısıyla, $N_w(s)$ bileşeni yüksekliğe, zamana ve konuma bağlı olarak büyük değişimler gösterdiğinden modellendirilmesi oldukça zordur [42].

Ayrıca, ıslak bileşen ile arazide yapılan meteorolojik ölçüler arasında çok az korelasyon olduğu için arazide yapılan bu ölçülerle gerçeğe yakın sonuçlar elde edilememektedir [34]. Islak bileşenin modellendirilmesindeki bu zorluklardan dolayı halen yoğun çalışmalar devam etmektedir. Bu konuyla ilgili olarak 1991 yılında özel bir çalışma grubu kurulmuştur [45].

Islak ve kuru bileşenlerin zenit açısına bağlı olarak büyüklükleri Tablo-4.2'de verilmektedir [7], ($T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=1013.25\text{ mbar}$). Burada, (4.4) eşitliğine uyumlu olarak kuru bileşen ΔS_d , ıslak bileşen ise ΔS_w ile gösterilmiştir.

Tablo-4.2. ΔS_d ve ΔS_w değerleri

Zenit Açısı (derece)	Kuru Bileşenin Etkisi ΔS_d (m)	Islak Bileşenin Etkisi ΔS_w (m)
0	2.3	0.2
60	4.6	0.4
80	13.0	1.2
85	26.0	2.3

Tablo 4.2'den görüleceği gibi, yerel zenit'de ($Z=0^{\circ}$) ve deniz seviyesindeki enlemlerde ΔS_d değeri $\sim 2.31\text{ m}$, ΔS_w ise $\sim 20\text{ cm}$ dir. Zenit açısı büyüdükçe bu değerler artmaktadır. Başka bir deyişle, 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 o kadar fazla olacaktır. Bu artım miktarı da yaklaşık $1/\cos Z$ kadardır. Dolayısıyla, troposferik gecikme, GPS sinyalinin troposfer katmanındaki katettiği yola bağlı olduğundan aynı zamanda uyduya olan zenit açısının da bir fonksiyonu olacaktır. Bu nedenle, GPS ile gözlemlerde ve değerlendirmelerde genelde uydu yükseklik açısı 15 derece ve yukarısı seçilmektedir. 15 dereceden daha küçük veri toplama açılarının kabul edilmesi ayrıca Bölüm-5'de açıklanacak olan sinyal yansıma etkilerine (multipath) de neden olacaktır.

Tablo-4.2 için bir grafik çizildiğinde belirli zenit açılarında troposferik gecikme etkisinin; zenit doğrultusundaki gecikme etkisi ile bu etkinin daha büyük zenit açılarındaki değerlerini hesaplamaya yarayan bir fonksiyon ile çarpımı sonucu hesaplanabileceği görülebilir. Zenit doğrultusundaki gecikme miktarından yararlanarak herhangi zenit açısı doğrultusundaki değerin

hesaplanmasını sağlayan $1/\cos Z$ fonksiyonuna projeksiyon fonksiyonu (mapping function) adı verilmektedir [42,44]. $1/\cos Z$ deneysel bir ifade olup bu konuda daha ayrıntılı çalışmalar farklı araştırmacılar tarafından yapılmış ve daha duyarlı fonksiyonlar yayımlanmıştır [47-53,38,20]. Mevcut troposferik (mapping function) modeller Tablo-4.3'de verilmektedir. Bu kadar farklı ve çok sayıda projeksiyon fonksiyonu olmasına karşılık GPS ile gözlemlerde ve değerlendirmelerde uydu yükseklik açısının 20 derece ve daha büyük seçilmesi durumunda bu modellerin hangisinin kullanılacağı önemsiz olmaktadır. Çünkü, 20 derece ve daha büyük yükseklik açıları için bu modeller arasındaki fark çok küçüktür (Şekil-4.3, 4.4 ve 4.5), [49, 54, 55]. Bu şekillerde numara ile gösterilen grafik çizimler aşağıdaki modelleri göstermektedir.

- 1= LANYI, [49]
- 2= BLACK, [52]
- 3= BLACK+EISNER, [58]
- 4= CHAO, [60]
- 5= MARINI, [51]
- 6= SAASTAMOINEN, [47]

Sözkonusu projeksiyon fonksiyonlarının ayrıntılı bir karşılaştırması [64]'de verilmektedir. Ayrıca, bu modellerin önemli bazıları ile ilgili açık formüller EK-A'da sunulmuştur.

Ayrıca, su buharının etkisi 10 km yükseklikten sonra sıfır değerini aldığından ve kuru atmosfer etkisi 40-50 km'ye kadar uzandığından uygulamada ıslak ve kuru bileşenler için farklı projeksiyon fonksiyonları kullanılmaktadır. Böylece yerel zenit doğrultusundaki kuru gecikme etkisi (4.4) eşitliğinden ΔS_d^o ile, ıslak gecikme etkisi ΔS_w^o ile, kuru bileşen için projeksiyon fonksiyonu f_d ; ıslak bileşen için f_w ile ve herhangi zenit uzaklığındaki toplam troposferik gecikme etkisi de ΔS_{trop}^z ile gösterilirse sonuç eşitlik olarak,

$$\Delta S_{trop}^z = f_d^{(z)} \cdot \Delta S_d^o + f_w^{(z)} \cdot \Delta S_w^o \quad (4.7)$$

yazılabilir [46]. Örnek olarak, $f_d^{(z)}$ ve $f_w^{(z)}$ fonksiyonları [48]'de

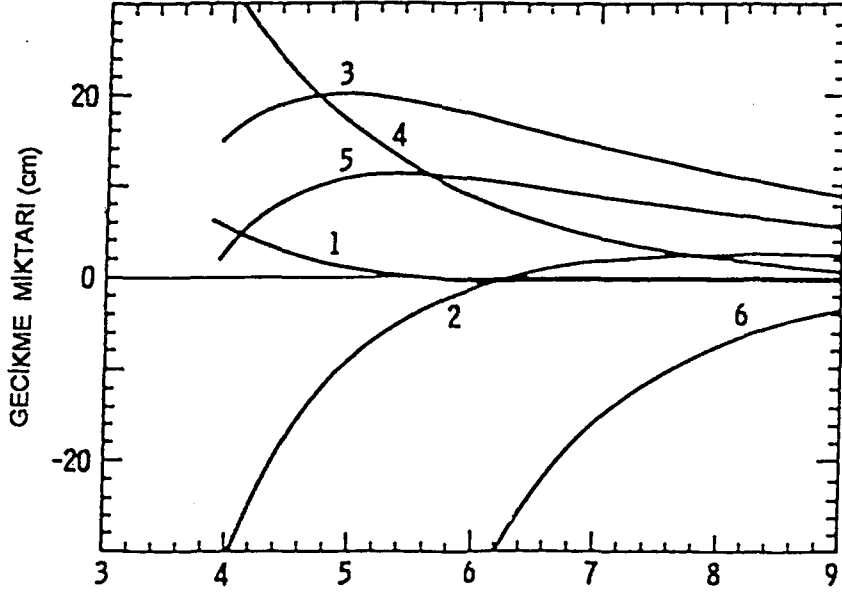
$$f_w^{(z)} = \frac{1}{\sin E + \frac{0.00035}{0.0170 + \tan E}} \quad (4.8a)$$

$$f_d^{(z)} = \frac{1}{\sin E + \frac{0.00143}{0.04454 + \tan E}} \quad (4.8b)$$

E : uydu yükseklik açısı ($E=90-Z$)
ile verilmektedir.

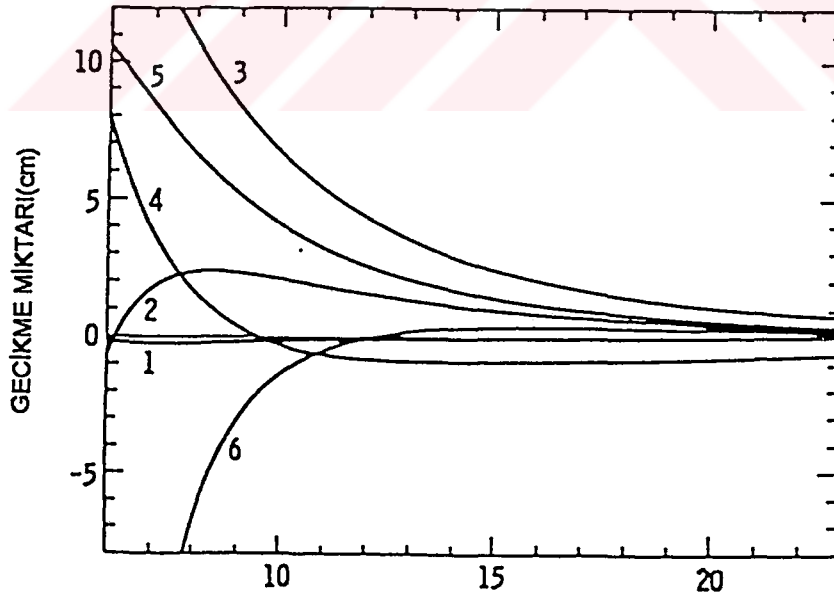
Tablo-4.3. Troposferik Modeller(Mapping Functions)

- | |
|--|
| <p>A. Hopfield (1971), [38] ve ilgili diğerleri</p> <ul style="list-style-type: none"> - Yionoulis (1970), [55] - Goad and Goodman (1974), [57] - Black (1978), [52] - Black and Eisner (1984), [58] <p>B. Saastamoinen Modeli (1973), [59]</p> <ul style="list-style-type: none"> - Duyarlı formüller ile - Standart formüller ile <p>C. Sürekli-Kesirli Modeller</p> <ul style="list-style-type: none"> - Marini and Murray (Marini 1972[51]; Davis [50]) - Chao (1972), [61] - Davis (1986), [50] - Niell (1995), [62] - Herring (1992), [63] <p>D. Su Buharı (WVRs: Water Vapour Radiometers) Modelleri</p> <ul style="list-style-type: none"> - Chao (1973), [48] - Berman 70 (1976), [61] - Berman 76 (1976), [61] |
|--|



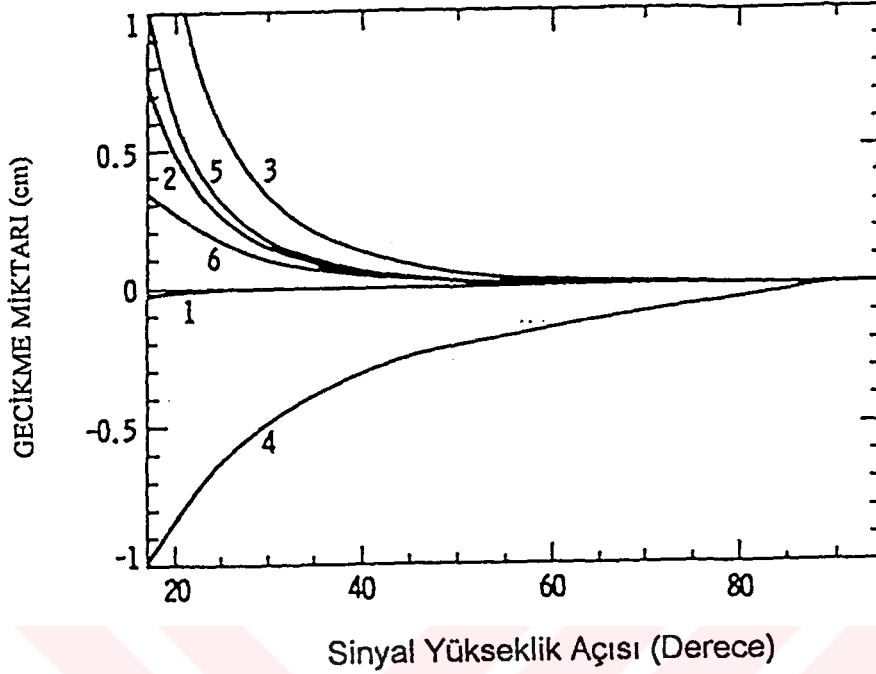
Sinyal Yükseklik Açısı (Derece)

Şekil-4.3. Farklı Projeksiyon Fonksiyonları (Mapping Functions) Arasındaki Farklar (3-9 derece), [47].



Sinyal Yükseklik Açısı (Derece)

Şekil-4.4. Farklı Projeksiyon Fonksiyonları (Mapping Functions) Arasındaki Farklar (10-20 derece), [47].



Şekil-4.5. Farklı Projeksiyon Fonksiyonları (Mapping Functions) Arasındaki Farklar (20-90 derece), [47].

4.3. Troposferik Gecikme Etkisinin Hesabı İçin Gerekli Atmosferik Parametrelerin Ölçümü

Troposferik gecikme hesabında kullanılan atmosferik parametreler standart troposferik modellerden, gözlem noktasında ölçülen meteorolojik verilerden (basınç, kuru ısı ve ıslak ısı) veya daha karmaşık teknikler olan su buharı radyometrelerinden (WVR; Water Vapour Radiometers) ve radyosondajlardan yararlanarak elde edilmektedir.

4.3.1. Gözlem Noktasında Ölçülen Meteorolojik Parametreler (SM)

Gözlem noktasında ölçülen meteorolojik verilerden (SM: Surface Meteorological Values) yararlanarak troposferik gecikmenin hesaplandığı birçok atmosferik model ([59,65] vb.) geliştirilmiştir.

Yanlış ölçülmüş ya da uygun şekilde ölçülmemiş SM değerleri veri analizi sonucunda elde edilen GPS sonuçlarında sapmalara (bias) neden olmaktadır. Genel olarak, söz konusu SM ölçülerinden yararlanarak troposferik gecikme hesaplayan modeller, bölüm (4.3.2)'de açıklanan standart modellere göre çoğu zaman daha kötü sonuçlar vermektedir. Çünkü, öncelikle yüksek doğruluklu meteorolojik ölçü yapmak zordur ve sık sık önemli ölçüm hataları meydana gelmektedir. Ayrıca GPS noktalarında ölçülen bu parametreler noktanın üzerindeki atmosferi iyi temsil edememektedir. Bu nedenle özellikle kısa kenarlı (~5 km x 15 km) GPS ağlarındaki hesaplamalarda ölçülen atmosferik parametreleri doğrudan kullanma özel haller dışında genellikle tercih edilmemektedir [18].

Zenit doğrultusundaki troposferik gecikme ΔS_{trop}^z nin arazide GPS gözlemleri sırasında ölçülen meteorolojik parametrelere bağımlılığını gösteren sonuçlar [66]'da hesaplanmış olup Tablo-4.4'de verilmektedir. Burada, bir bazın herhangi bir ucundaki gözlem noktasında sıcaklık ölçümünde 1 derece, basınç ölçümünde 1 mbar ve nemde %1'lik bir hata olması durumunda bu hatanın hesaplanan troposferik gecikme miktarındaki olası (ΔS_{trop}^z) etkisi gösterilmektedir. Burada T, atmosferik sıcaklığı, P atmosferik basıncı ve H ise atmosferin nem oranını göstermektedir.

Tablo-4.4. Troposferik gecikmenin $Z=0^\circ$ doğrultusunda meteorolojik parametrelere olan bağımlılığı.

T (°C)	P mbar	H %	$\left \frac{\partial \Delta S_{\text{trop}}^z}{\partial T} \right $ (mm/°C)	$\left \frac{\partial \Delta S_{\text{trop}}^z}{\partial P} \right $ (mm/mbar)	$\left \frac{\partial \Delta S_{\text{trop}}^z}{\partial H} \right $ (mm/(%1))
0	1000	100	5	2	0.6
30	1000	100	27	2	4
0	1000	50	3	2	0.6
30	1000	50	14	2	4

Tablo-4.4'den de görüldüğü gibi yüksek sıcaklık ve nem GPS sonuçlarını olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısıyla, arazide ölçülen atmosferik parametrelerdeki küçük hatalar bile özellikle nokta yüksekliklerinin hesabında önemli hatalara neden olacaktır.

4.3.2. Standart Atmosfer Modelleri Yardımıyla Troposferik Etkinin Hesabı

4.3.1.'de de açıklandığı gibi, GPS gözlemleri yapılan noktalarda atmosferik parametrelerin ölçümü ; kullanılan aletlerin kalibrasyon hataları, yapılan atmosferik ölçülerin noktanın üstündeki sinyal yolunu (uydu-alıcı uzaklığını) iyi temsil edememesi gibi nedenlerle, elde edilen GPS sonuçlarında önemli hatalara neden olmaktadır. Bu durum özellikle kısa kenarlı (~5-20 km) GPS ağlarında daha da önem kazanmaktadır. Bu sakıncalardan kaçınmak için standart atmosfer modelinden yararlı hesaplanan atmosferik verilerin kullanılması günümüzde GPS gözlemlerinin değerlendirilmesinde oldukça yaygın hale gelmiştir.

Standart atmosfer modelinde genellikle, deniz düzeyindeki referans (başlangıç) sıcaklık (T_0), basınç (P_0) ve nem (H_0) değerleri tanımlanmakta ve bu değerlerin yükseklikle doğrusal değiştiği kabul edilerek, GPS gözlemi yapılan nokta yüksekliğindeki atmosferik parametre değerleri hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu değerlerin zamandan ve gerçek durumdaki atmosferik koşullardan bağımsız olacağı açıktır.

Söz konusu referans değerleri için genellikle

$$\begin{aligned} h_0 &= 0 \text{ m} \\ T_0 &= 18^\circ \text{C} \\ P_0 &= 1013.25 \text{ mbar} \\ H_0 &= \%50 \end{aligned}$$

değerleri kabul edilmektedir. Böylece h_u yüksekliğindeki bir nokta için extrapole edilmiş değerler,

$$T_u = T_0 - 0.0065 h_u \quad (4.9a)$$

$$P_u = P_0 (1 - 0.0000226 \cdot h_u)^{5.255} \quad (4.9b)$$

$$H_u = H_0 \cdot \exp(-0.0006396 \cdot h_u) \quad (4.9c)$$

$$h_u = h - h_u \quad (4.9d)$$

olarak verilmektedir [18,70]. Bu değerler Ek-A'da (Saastamoinen (1973) veya Hopfield (1977)) verilen formüllerde kullanılarak GPS gözlemi yapılan noktadaki atmosferik değerler ve bunlara bağlı olarak da troposferik gecikme miktarı hesaplanmaktadır. Özellikle kısa kenarlı ağlarda (iki nokta arasındaki yükseklik farkının çok fazla olduğu özel durumlar dışında) bu şekilde hesaplanan troposferik gecikme miktarının arazide ölçülen gerçek değerlerden (SM) hesaplanana göre daha tutarlı sonuçlar verdiği birçok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur [20,67,68].

4.3.3. Su Buharı Radyometreleri (WVR; Water Vapor Radiometer)

Atmosferdeki su buharı dağılımı yeterli doğrulukta modellendirilemediğinden, GPS'in jeodinamik amaçlı kullanımı veya VLBI (Very Long Baseline Interferometry) gözlemleri gibi çok yüksek doğruluk isteyen çalışmalar sözkonusu olduğunda uydu-alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca olan su buharı dağılımını doğrudan ölçme yoluna gidilir. Bu ise atmosferdeki su buharı tarafından yayınlanan mikrodalga radyasyonunu ölçen su buharı radyometreleri (WVR; Water Vapor Radiometry) ile yapılmaktadır.

WVR tekniği ile ilgili birçok araştırma yapılmış olup bununla ilgili ayrıntılı bilgiler [37] ve [69]'da verilmektedir. Kısaca, WVR ile atmosferdeki açık gökyüzü sıcaklığı (sky brightness temperature) ölçülmektedir [39,50]. Bu ölçülerden yararlanarak sinyal yolundaki troposferik gecikme etkisinin ıslak bileşeni ($N_w(s)$) hesaplanmaktadır. Söz konusu gecikme WVR ölçülerinden yararlanarak 1-3 cm doğruluğunda belirlenebilmektedir [10,37].

WVR, çift kanallı, pasif uzaktan algılama tekniğine dayanan bir mikrodalga radyometresidir. Bu cihaz yoğun yağmurda çalışamaz ancak açık ve bulutlu havalarda çalışabilir. Uygun anten düzenleri ile 10 derecelik yükseklik açılara kadar gözlem yapabilir [37]. Günümüzde WVR'ler daha çok VLBI gözlemleri ile birlikte kullanılmaktadır. Pahalı ve ağır bir sistem olması nedeniyle henüz GPS kampanyalarında pek tercih edilmemektedir.

Günümüzde farklı WVR'ler üretilmiş olup bunlar,

- R-serisi WVR'ler, [71]
- Onsala WVR , [72]
- J-serisi WVR'ler, [69]

şeklinde sıralanabilir.

Troposferik etkinin doğru olarak modellendirilmesindeki zorluklar nedeniyle araştırmaların biraz zaman alacağı açıktır. Örneğin [49]'da bu etkinin modellendirilmesinde en etkili yöntemin mevcut tüm tekniklerin (SM ölçüleri, radyo sondaj verileri, WVR gözlemleri ve istatistikler) birleştirilmesi ile elde edilebileceği ifade edilmiştir. Ancak bunun için henüz uygun bir model geliştirilmemiştir.

4.4. Troposferik Parametrelerin Hesabı

Günümüzde mevcut pratik ve/veya bilimsel amaçlı GPS değerlendirme yazılımlarının çoğunda troposferik etkinin hesabında iki temel yöntem uygulanmaktadır. Bunlardan, özellikle pratik amaçlı yazılımlar, troposferik etkinin hesabında genellikle, bölüm (4.3.2)'de anlatılan standart atmosfer modelini (model atmosfer) kullanmaktadır. Dolayısıyla, standart atmosfer modelinden olan sapmaların küçük değerler olduğu kabul edilmekte ve bu değerler dikkate alınmamaktadır.

Oysa bilimsel amaçlı yazılımlarda troposferik etki hesabı iki aşamalı olarak gerçekleştirilmektedir. Birinci aşamada standart atmosfer modeline ilişkin troposferik etki hesaplanmakta, daha sonra bu model atmosferden olan sapmalar farklı modellendirmeler kullanılarak hesaplanmaktadır. İkinci aşamadaki hesaplamalar genellikle "zenit gecikme" parametrelerinin belirlenmesi olarak bilinmektedir. Dolayısıyla, bundan sonraki bölümlerde "zenit gecikme" parametrelerinin hesaplanması ile standart atmosfer modelinden olan sapmaların (ya da standart model ile elde edilen değerlere getirilecek olan düzeltmelerin) belirlenmesi ifade edilecektir.

Günümüzde mevcut bilimsel amaçlı GPS ölçülerini değerlendirme yazılımlarında, zenit gecikme parametrelerinin hesabında iki temel yöntem uygulanmaktadır [73]. Bunlar;

a) Zenit gecikme değerlerinin Standart En Küçük Kareler (EKK) yöntemi ile hesaplanması (yani, her bir nokta ve gözlem gurubu için 1 parametre),

b) Zenit gecikme değerlerinin, filtreleme algoritmaları kullanılarak hesaplanması.

Bunların dışındaki ara yöntemlerden bazıları ise her ölçü gurubu için birden fazla (örneğin, her saat için bir) parametre hesabıdır ve bu parametreler özellikle kısa kenarlı ağlarda nokta yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak belirlenir [70].

4.4.1. Troposferik Parametrelerin Deterministik Yöntemle Hesaplanması

Her bir nokta ve ölçü grubu için 1 zenit parametresi hesaplandığı yöntem günümüzde bilimsel amaçlı değerlendirme yazılımlarının çoğunda uygulanmaktadır.

Bu yöntemin esas troposferik etkileri kısa dönemli değişimlerin birkaç saat gibi uzun süreler söz konusu olduğunda ortalama bir değere ulaştığı varsayımına dayanmaktadır [73].

Burada her bir ölçü grubu ve nokta için bir tane hesaplamak yerine örneğin (a) her yarım saatte bir zenit gecikmelerini hesaplayarak ve/veya (b) aynı noktaya ait bu ardışık parametreler arasında öncül (a priori) görelî kısıtlamalar (ağırlıklar) verilerek deterministik yöntem daha da iyileştirilebilir. (a)'da anlatılan yöntemin en büyük sakıncası normal denklemler matrisindeki parametre sayısının çok sayıda olmasıdır. Örneğin 10 noktalı bir ağda 10 gün süreyle 10 saatlik gözlem yapıldığı düşünülürse ve her saat için 1 zenit parametresi hesaplanmak istenirse normal deklemler matrisine fazladan 1000 bilinmeyen daha girmiş olacaktır. Bu durumda değerlendirmenin ilk aşamasında troposferik parametreler gözardı edilirler (pre-eliminated) ve ikinci aşamada, birinci aşamada hesaplanmış olan büyüklüklerin yerini alarak belirlenirler. Bu konu ile ilgili ayrıntılı bilgi [68]'de verilmektedir. (b)'de

belirtilen göreceli ağırlıklar (σ_{relative}) yöntemi için bir ölçüt olarak troposferik gecikmenin saatte 1 cm değiştiği kabul edilerek, ardışık parametreler için 1 mm/saat ağırlığı verilebilir [74]. Böylece, ardışık hesaplanacak parametrelerin arasındaki farkların belli bir büyüklüğü aşmaması sağlanmaktadır. Diğer bir ifadeyle ardışık parametreler arasındaki farklar sınırlandırılmaktadır.

Özel bir durum olan kısa kenarlı ağlarda yüksekliğin bir fonksiyonu olarak troposferik parametrelerin hesabı daha çok noktalar arasında büyük yükseklik farkı (~500 m) olması durumunda uygulanmaktadır. Bu yöntemde yatay sıcaklık gradyanlarının olmadığı ve yükseklikteki temel hatanın ağın en düşük ve en yüksek noktaları arasında kalan atmosfer tabakasının etkisi nedeniyle oluştuğu kabul edilmektedir. Böylece yüksekliğin bir fonksiyonu olarak hesaplanan zenit gecikmesi

$$\Delta S_{\text{trop}}^{\circ}(h) = \Delta S_{\text{trop}}^{\infty}(h) + \sum_{i=1}^q a_i (h - h_{\text{ref}})^i \quad (4.10)$$

ile verilmekte olup burada,

$\Delta S_{\text{trop}(h)}^{\circ}$: h yüksekliğindeki zenit gecikme etkisini,

$\Delta S_{\text{trop}(h)}^{\infty}$: standart atmosfer modelinden yararlanarak hesaplanmış
öncül değerleri,

q: polinomun derecesini (genelde q=1,2),

a_i : ağa ait GPS gözlemlerinden yararlanarak hesaplanacak olan
katsayıları,

h_{ref} : modeldeki referans yüksekliği (örneğin ağdaki en düşük yükseklikli
nokta) göstermektedir.

Bu yöntemde her bir ölçü grubu veya kampanya için tek bir parametre hesaplandığından normal denklemler matrisindeki bilinmeyen sayısını önemli ölçüde artırmayacaktır.

Burada, ölçü bölgesinde normal (standart) atmosferden olan sapmaların yüksekliğin doğrusal bir fonksiyonu olduğu (ağ noktaları birbirinden dağlarla ayrılmamış) kabul edildiğinden bu yöntemin geçerliliğini test etmenin tek yolu

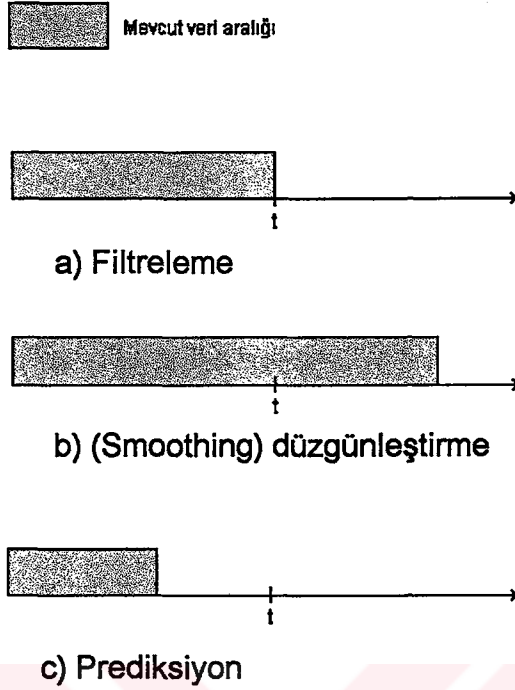
aynı bölgede ölçülmüş gerçek meteorolojik verilerden yararlanmaktadır. Bu yöntem büyük dağlık bölgelerde uygun sonuçlar vermemektedir. Bu yöntemle ilgili ayrıntılı bilgi [70]'de verilmektedir.

4.4.2. Troposferik Parametrelerin Stokastik Olarak Hesaplanması

Buraya kadar anlatılan yöntemlerde belirli bir gözlem grubu (session) ve nokta için bir troposferik parametre hesabı söz konusudur. Oysa atmosfer bu gözlem grubu süresince de değişim içerisindedir. Gerçek zenit gecikme değeri ile standart modelden yararlanarak hesaplanan zenit gecikme değeri arasındaki fark artık zenit gecikme değeri olarak tanımlanırsa, yukarıda sözü edilen standart model ile bir gözlem süresince artık zenit gecikme değerlerinde meydana gelen değişimlerin ortalama bir değer olarak hesaplandığı düşünülebilir. Oysa bu şekildeki değişimler atmosferin ıslak bileşeninde yaklaşık 3 cm/saat'lik değişime neden olabilmektedir [31]. Bu nedenle günümüzde özellikle yükseklik bileşeninin önemli olduğu bilimsel çalışmalarda standart model yerine zamana bağımlı teknikler kullanılmaktadır. Bu tekniklerden en çok kullanılanı ise stokastik model olarak adlandırılmaktadır. Bu model bazı araştırmacılar tarafından ([39,75]) yaygın şekilde kullanılmış ve önemli sonuçlar elde edilmiştir. Bu modelde bilinmeyen artık zenit gecikme değerleri zamana bağlı olarak değişen parametreler olarak ele alınmaktadır. En çok kullanılan stokastik işlem modelleri ise "Random Walk Process", "White Noise" ve "First Order Gauss-Markoff Process" yöntemleridir.

Uydu sinyallerinin zenit doğrultusundaki troposferik gecikme etkisinin zamana bağımlı değişimleri yukarıda belirtilen yöntemlerden birisi ile modellendirilebilmektedir. Burada zenit gecikme parametreleri her bir epok için modellendirilmektedir. Genel olarak deterministik troposferik parametrelerin hesabında EKK, stokastik troposferik parametrelerin hesabında ise Kalman Filtreleme (Kalman Filtering) yöntemi kullanılmaktadır.

Kalman filtreleme yöntemi açıklanmadan önce bazı tanımların kısaca tekrarlanması yarar bulunmaktadır. Bilindiği gibi parametre kestiriminde üç tip problem mevcuttur (Şekil-4.6), [76].



Şekil-4.6. Parametre kestirimi problemleri

Eğer tahmin yapılması istenen zaman en son ölçü zamanı ile çakışıyorsa bu bir filtreleme problemidir. Eğer, tahmin yapılması istenen zaman elde mevcut veri kümesi içerisinde kalıyorsa bu bir düzgünleştirme (smoothing) problemidir. Eğer, tahmin yapılması istenen zaman son ölçü zamanından daha sonrası içinse bu durumda prediksyon problemi söz konusudur.

Günümüzde en yaygın olarak kullanılan filtreleme tekniği Kalman tarafından geliştirilmiş olan tekniktir [77]. Bu teknik ağırlıklı en küçük kareler yönteminin ardışık şekilde her bir epok için uygulanması olarak düşünülebilir.

Bu yöntemde ilk aşama (t_i-1) 'inci epoktaki stokastik ve deterministik parametrelere ait en iyi tahmin değerinden yararlanarak, aynı parametrelerin t_i 'inci epoktaki beklenen değerlerinin hesaplanmasıdır. Eğer bu parametreler zamanla değişmiyorsa t_i 'inci epoka ait değerler ile (t_i-1) 'inci epoka ait değerler aynı olacaktır. Ancak, daha önceden de belirtildiği gibi alıcı saati ve atmosferik parametreler zamana bağlı olarak raslantısal değişim gösterdiğinden t_i 'inci epoktaki beklenen değerler (t_i-1) 'inci epoktaki değerlerinden yararlanarak

$$\begin{bmatrix} \Phi(t_i) \\ w(t_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi(t_{i-1}) \\ w(t_{i-1}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \Phi(t_i) \\ \Delta w(t_i) \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

ile verilmekte olup burada Φ kayıklık (offset) ve w (değişim) değeri, t 'inci epok için tahmin edilecek olan parametreler, $\Delta t_i = t_i - (t_i - 1)$; $\Phi_{(t_i)}$ ve $w_{(t_i)}$ ise aynı parametrelerin (bilinmeyen) raslantısal değişimlerini ifade etmektedir [76]. Burada $E(\Phi_{(t_i)}) = 0$ ve $E(w_{(t_i)}) = 0$ (raslantısal değişimlerin normal dağılımında olduğu) kabul edilmektedir. Böylece, saat ve atmosferik parametrelerin istenen epoka ait değerleri $(t_i - 1)$ 'inci epoktaki mevcut değerlerin t_i 'inci epoka kaydırılması ile elde edilmektedir. Örneğin herhangi bir $(t_i - 1)$ 'inci epoktaki alıcı saati kayıklığı 10 psec ($1 \text{ psec} = 10^{-12} \text{ sn}$) ve bu değerlerin raslantısal değişim oranı 0.1 psec/dk ise (4.1.1.) eşitliğine göre 10 dakika sonrası için kayıklık değeri $10 + 0.1 \times 10 = 11$ psec olacaktır.

Böylece, t_i 'inci epoktaki hesaplamalar tamamlandığında, aynı işlem $t_i + 1$ 'inci epok için tekrar edilir, ve sonuç olarak tüm gözlemler bitinceye kadar bu işleme devam edilir. Bu işleme ileriye doğru filtreleme (Forward Kalman Filter) adı verilmektedir. Bunun için söz konusu parametreler ve bunların kovaryans matrislerinin öncül (a priori) değerleri belirli olmalıdır [73]. Yani, t_i 'inci zamandaki yeni tahmin değerlerine ait kovaryans matrisinin elde edilmesi için bir önceki epoka ait $(t_i - 1)$ kovaryans matrisi ile bilinmeyen raslantısal değişimlere ait kovaryanslar biliniyor olmalıdır. Dolayısıyla t_i 'inci epoktaki kovaryans matrisi $(t_i - 1)$ 'inci epoktaki kovaryans matrisi ile stokastik parametrelerin kovaryans matrisinin basit bir toplamından oluşmaktadır [76]. Tüm gözlemler ileriye doğru Kalman filtreleme ile hesaplandığında, sonuçta stokastik olmayan parametrelerin en son tahmin değerleri elde edilmiş olacaktır. Stokastik parametrelere ilişkin bilgilerin elde edilmesi için de geriye doğru (backward) Kalman filtreleme veya düzgünleştirme (smoothing) Kalman filtreleme çözümü uygulanmalıdır. Bu aşamanın yapılması gereklidir çünkü $(t_i - 1)$ 'inci epoktaki stokastik parametre tahmin değerleri takibeden t_i , $t_i + 1$, $t_i + 2 \dots$ nci epoklardaki gözlemlerden yararlanarak elde edilmiş parametrelerle ilgili bilgi taşımamaktadır.

Farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda stokastik model ile belirlenen troposferik gecikme parametrelerinin WVR gözlemleri ile doğrudan elde edilen değerlerle çok uyumlu olduğu gösterilmiştir. Örneğin, [78]'de standart bir model yardımıyla sabit bir troposferik parametre yerine

stokastik yöntem kullanılması hesaplanan büyüklükler arasındaki uyumu (repeatability) 2 kat iyileştirdiği gösterilmiştir.[79] 'da ise Random Walk kestirim yöntemi ile WVR kullanmak arasında baz tekrarlanabilirliği açısından önemli bir fark olmadığı belirlenmiştir.

4.5. Bernese Yazılımında Troposferik Etki

Bernese yazılımında troposferik gecikme etkisinin hesabında aşağıdaki ana modeller kullanılmaktadır;

- a) Saastamoinen Modeli, [47]
- b) Modified Hopfield Model, [57]
- c) Simplified Hopfield Model, [80]
- d) Essen & Froome diferansiyel refraksiyon modeli, [81]

Yukarıdaki modellerin tamamında arazide ölçülmüş gerçek meteorolojik (SM) veriler ya da standart atmosfer modeli kullanılabilmektedir.

Bernese yazılımı üç farklı tip atmosferik parametre dosyasını (file) girdi olarak kabul edebilmektedir. Herbir dosyada başlık bilgileri (nokta adı, UTC-yerel zaman farkı vs.) standart olarak mevcut olup bunun dışında aşağıdaki büyüklükler bulunmaktadır ;

- File 1 : Tarih-saat grubu, hava basıncı, sıcaklık ve oransal nem
- File 2 : Tarih-saat grubu, hava basıncı, kuru sıcaklık, ıslak sıcaklık
- File 3 : Tarih-saat grubu, zenit gecikme değerleri

Bunlardan File 3, SM verilerinden yararlanarak hesaplanan zenit gecikme değerlerinin veya WVR gözlemlerinin yazılımda girdi olmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır.

File 1,2 ve 3 ile ilgili örnekler sırasıyla, Tablo-4.5,4.6 ve 4.7'de verilmektedir.

Tablo-4.5. File 1

MARM94 BERNESE MET. FILES

STATION: ITAY UTC-LOCAL TIME(HOURS)=0 TYP=1

JJ	MM	DD	HH	MM	SS	PPP.PP	TT.TT	HH.HH
94	08	28	18	00	6	911.40	11.20	72.10
94	08	28	18	30	5	911.90	10.40	69.30
94	08	28	19	00	4	912.20	08.20	81.10
94	08	29	19	30	5	912.40	08.20	82.50
94	08	29	20	00	4	912.70	08.40	82.60
94	08	29	20	30	4	912.60	08.60	81.80
-1	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00

Tablo-4.6. File 2

EXAMPLE FOR DRY AND WET TEMPERATURE 21-DEC-1995 13:17

STATION: ITAY UTC-LOCAL TIME(HOURS)=0 TYP=2

JJ	MM	DD	HH	MM	SS	PPP.PP	TDRY	TWET
94	08	28	18	00	6	911.40	12.61	17.41
94	08	28	18	30	5	911.90	12.94	22.29
94	08	28	19	00	4	912.20	12.76	23.37
94	08	29	19	30	5	912.40	12.71	25.15
94	08	29	20	00	4	912.70	13.65	15.94
94	08	29	20	30	4	912.60	14.11	21.36
-1	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00

Tablo-4.7. File 3

EXAMPLE OF A ZENITH DELAY FILE

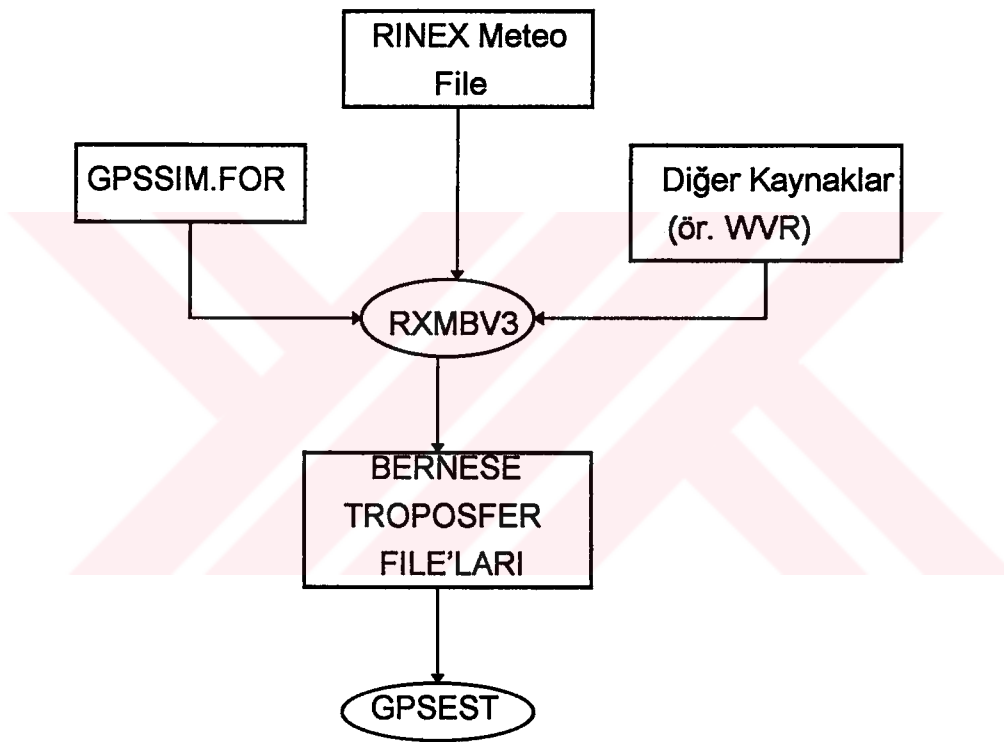
21-DEC-1995 13:17

STATION: ITAY UTC-LOCAL TIME(HOURS)=0 TYP=3

JJ	MM	DD	HH	MM	SS	ZENITH DELAY (M)
94	08	28	18	00	6	0.100
94	08	28	18	30	5	0.115
94	08	28	19	00	4	0.127
94	08	29	19	30	5	0.140
94	08	29	20	00	4	0.150
94	08	29	20	30	4	0.140
-1	0	0	0	0	0	0.000

Bernese yazılımında, troposferik gecikme hesabı iş akışı Şekil-4.7'de görülmektedir.

SM verileri, rinex formatında hazırlanan dosyalar (rinex meteo files) ile yazılıma girdi olmaktadır. Daha sonra bu rinex formatındaki veriler RXMBV3 programı ile Tablo-4.5'de verilen Bernese formatındaki File-1 haline getirilmektedir



Şekil-4.7. Troposferik Gecikme Hesabı İş Akışı

Diğer taraftan eğer GPSSIM (simülasyon) programı ile elde edilmiş olan basınç, sıcaklık ve nisbi nem değerleri varsa File 1, eğer stokastik zenit gecikme değerleri hesaplanmışsa File 3 oluşturulmaktadır.

GPSEST ise Bernese yazılımının, tüm GPS parametrelerinin hesaplandığı, temel parametre tahmini programıdır. Burada sonuç olarak iki farklı troposferik parametre hesaplanmaktadır. Bunlar;

- Her bir nokta için bir veya daha fazla sayıda zenit gecikme değerleri, (Bölüm 4.4.1.)

- Noktalar arasındaki yükseklik farkının büyük olduğu küçük ağlarda, yüksekliğin bir fonksiyonu olarak (4.1) eşitliği ile verilen zenit gecikme değerleridir.

4.6. Troposferik Gecikme Değerlerinin Jeodezik Parametrelere Olan Etkisi

Son yıllarda troposferik gecikme hatalarının özellikle nokta koordinatları üzerindeki etkisi ile ilgili birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalarda troposferik gecikme hesabı genel olarak iki farklı şekilde ele alınmakta olup bunlar görelî ve mutlak troposferik gecikmedir.

4.6.1. Görelî Troposferik Gecikme Etkisi

Görelî troposferik gecikme etkisi bir bazın her iki ucundaki troposferik gecikme etkilerinin farkı olarak tanımlanabilir. [14]'de verilen bir çalışmada troposferik gecikme etkisinin nokta yüksekliğinde temel hataya neden olduğu, yatay koordinatlardaki (enlem, boylam) hatanın ise gözardı edilebilecek kadar küçük olduğu gösterilmiştir. Dolayısıyla, GPS gözlemi yapılan noktalarda aynı anda kaydedilmiş bulunan gerçek meteorolojik parametrelerin (SM), tablo-4.3'de verilen modellerden herhangi birinde yerine konarak hesaplanacak olan nokta yükseklikleri genellikle kısa kenarlı ağlarda (~20 km x 20 km) gerçek değerlere göre hatalı sonuçlar verecektir. Çünkü, (4.3.1)'de Tablo-4.4'e bakıldığında troposferik düzeltme ile sıcaklık arasında önemli bir korelasyon olduğu görülmektedir. Örneğin, bir gözlem noktasında sıcaklık ölçüsünde k derecelik bir hata yapılırsa sonuçta elde edilecek olan görelî hata miktarı (differential tropospheric effect);

$$\Delta S_o(z) = \frac{k}{\cos z_o} \cdot \frac{\partial \Delta S_o}{\partial T} \quad (4.12)$$

olacaktır.(Aynı eşitlikler basınç(P) ve nem oranı(H) için de yazılabilir.)
Sözkonusu $\Delta S_0(Z)$ hatasının noktalar arasındaki yükseklik farkına etkisi ise

$$\Delta h = \frac{\Delta S_0(z)}{\cos z} \quad (4.13)$$

ile verilmektedir [61].

Örneğin Tablo-4.4'den $Z=0^\circ$, $P=1000$ mbar, $T=30^\circ\text{C}$ ve $H=\%100$ değerleri için eğer sıcaklık ölçümünde 1°C lik hata yapıldığı düşünülürse ΔS_0 hata miktarı 27 mm, bunun sonucunda $Z_{\max}=70^\circ$ için yükseklik farkındaki (Δh) hata ise (4.13)'den yararlanarak 79 mm olarak elde edilir.

Sıcaklıkta yapılacak bu hata miktarı özel bir durum değildir (alet kalibrasyon hataları, topoğrafik etkiler vb. nedenlerle). Örneğin, sıcaklık ölçümündeki hata 0.3°C , basınçtaki hata 0.5 mbar ve nemdeki hata $\%1.5$ ise bu 1 mm'lik bir troposferik gecikme hatasına neden olmaktadır. Bu da nokta yüksekliği farkında yaklaşık 3 mm'lik bir hata demektir. Oysa standart meteoroloji aletlerini bu düzeyde ayarlamak hemen hemen olanaksızdır. Yukarıda verilen örnek değerler deniz düzeyinde ($T=0^\circ$, $P=1000$ mbar, $H=\%100$) için geçerli olup örneğin $T=30^\circ$ için elde edilecek sonuçlar bu değerlerin 5 katına ulaşacaktır [82].

Özellikle kısa bazların değerlendirilmesinde yukarıda belirtilen hatalar birbirini götürmeyeceğinden bir bazın iki ucundaki noktalara ait zenit gecikme hatalarının farkı (ΔdS_i ; $i=1,2$) yükseklik farkı hesaplamalarına doğrudan bir sistematik etki (bias) olarak girecektir. Bu etki miktarı ise (4.13) eşitliğinden yararlanarak hesaplanan noktalar arası yükseklik farkındaki etkiyi verecektir. $Z=70^\circ$ için ,

$$\Delta h = 3. \Delta dS \quad (4.14)$$

yazılabilir. Bir bazın iki ucunda yapılan sıcaklık ölçüleri arasında örneğin 1°C 'lik bir hata söz konusu olduğunda bunun yükseklik farkında 9 ile 80 mm

arasında bir hataya neden olabileceği (4.14) eşitliğinden açıkça görülmektedir.

Böylece, noktalar arasındaki yükseklik farklarının az olduğu (<100 m) kısa kenarlı bazlar değerlendirilirken en uygun çözüm yalnızca sabit noktaya ait meteorolojik verilerin kullanılması ve diğer noktalara ait verilerin ise bu sabit noktadan yararlanarak (sıcaklık, basınç ve nem için standart atmosfer değerlerinden yararlanarak yükseklik gradyenleri oluşturularak) üretilmesidir. Noktalar arası yükseklik farkının örneğin 100 m den küçük olması durumunda, yanlış gradyenlerin neden olacağı hatalar, alet kalibrasyonu veya topoğrafik etkilerin neden olacağı hatalardan çok daha küçüktür. Ancak, noktalar arasındaki yükseklik farkı 100 m den büyükse (dağlık bölge ise) kullanılacak olan yükseklik gradyenleri, gerçek gradyenlerden çok farklı olacağından, bu farklar meteorolojik parametrelerde göreceli troposferik sapmalara neden olacaktır. Bu durumda, troposferik zenit düzeltmesinin yüksekliğin bir fonksiyonu olarak hesaplanmasında, her bir noktadaki meteorolojik gözlemler kullanılmalıdır. Bu yaklaşımda sıcaklık, basınç ve nemde hiçbir yatay gradyenin olmadığı varsayılmaktadır [82].

4.6.2. Mutlak Troposferik Gecikme Etkisi

Mutlak troposferik gecikme etkisi, bir bazın her iki ucundaki noktada meydana gelen zenit gecikme etkilerinin aritmetik ortalaması olarak tanımlanabilir [68]. Bu etki baz uzunluğunu ölçek hatası olarak etkilemektedir. Başka bir deyişle bu etkinin göz ardı edilmesiyle hesaplanan bazlar olması gereken değerlerinden daha uzun olacaklardır.

Dolayısıyla ΔS büyüklüğündeki bir troposferik hatanın neden olacağı ölçek farklılığı (3.21) eşitliğinden ,

$$\frac{\Delta l}{l} \approx \frac{\Delta S}{R \cdot \cos z} \quad (4.15)$$

R : Yeryuvarının yarıçapı

şeklinde yazılabilir.

Örneğin zenit doğrultusundaki gecikmenin büyüklüğü 2.31 metre olduğuna göre, eğer bu etki gözardı edilirse, bunun baz uzunluğunda maksimum 1 ppm'lik bir ölçek farklılığına neden olacağı (4.15) eşitliğinden açıkça görülmektedir. (4.15) eşitliğinden de görüleceği gibi mutlak troposferik gecikme hatası mutlak iyonosferik gecikme hatası ile benzer etkiye sahip olup yalnızca ters işaretli (büyüklükleri farklı) sonuçlar vermektedir.

Buraya kadar anlatılan konularda kısa ve orta uzunluktaki bazların olduğu ağlar düşünülmüştür (<100-200 km). Oysa, kıtalararası uzunluklar söz konusu olduğunda (>1000 km) troposferik gecikme hesabında daha farklı stratejiler izlenmelidir. Örneğin, 1000 km'lik bazın iki ucundaki atmosferik koşullar birbirinden tamamen bağımsız olacağından aralarında bir korelasyon da olmayacaktır. Bu durumda da kısa uzunluklarda olduğu gibi fark gözlemleri oluşturularak ana troposferik etkinin giderilip artık (residual) etkilerin hesaplanması da olanaksız olacaktır. Çünkü, bu uzaklıklarda her bir noktadaki atmosferik koşulların nokta koordinatları üzerindeki etkileri tamamen raslantısal olacaktır.

Bu durumda en uygun çözüm, her bir noktada ölçülmüş olan gerçek meteorolojik parametrelerin (SM) doğrudan kullanılması olabilir. Ayrıca, birbirinden yüksek dağlarla ayrılmış vadiler de farklı atmosferik koşullara sahip olacağından böyle durumlarda da her bir vadi için ayrı troposferik modeller (vadiler arasındaki farklı atmosferik koşullardan dolayı korelasyon olmadığı varsayılırsa) öngörülebilir.

GPS ölçülerinden yararlanarak belirlenecek olan nokta yüksekliklerinin doğruluğunu etkileyen bir diğer faktör ise Atmosferik Basınç Yükleme (Atmospheric Pressure Loading)dir. Bu konuyla ilgili yapılan bir araştırmada özellikle yüksek enlemlerde, atmosferik basınç yüklemesinden dolayı, hesaplanan GPS yüksekliklerinde yaklaşık 1 cm'lik sapmalar olabileceği belirtilmiştir [106]. Bu durumdan kaçınmak için ya geniş alanları kapsayan atmosferik basınç modelleri kullanılmalı ya da sürekli gözlem yapılan GPS ağları oluşturulmalıdır. (Her ikisini birden uygulamak daha yararlı olacaktır).Ancak söz konusu etki 1000 km'den büyük uzaklıklar için etkili olduğundan kıtalararası çalışmalar için etkili bu durum önem kazanmaktadır. Bu gibi çalışmalarda yaklaşık 2 hafta sürekli (24 saat) GPS gözlemi yapılmaktadır [106]. Dolayısıyla, bir ülkenin kendi içinde yaptığı ve baz

uzunluklarının birkaç yüz kilometreyi geçmediği projelerde her ölçü günü yaklaşık 16-24 saat olan toplam 5-7 günlük sürekli ölçünün yeterli olacağı değerlendirilmektedir.

4.7. Sayısal Uygulama

GPS'de faz ölçüleri ile görelî konumlama yönteminde dikkate alınmayan troposferik etkinin orta uzunluktaki bazlar ile noktalar arasındaki yükseklik farklarına etkisini araştırmak için bir uygulama yapılmıştır. Bu uygulama için 1994 yılında yer kabuğu güncel hareketlerini belirlemek amacı ile Marmara Bölgesi'nde yapılmış olan GPS ölçülerinden yararlanılmıştır.

Bilindiği gibi, uydu jeodezisi yöntemleri ile kabuk hareketlerini daha geniş alanları kapsayacak biçimde inceleme olanağının son yıllarda ortaya çıkması üzerine Türkiye'de de 1987 yılında bu yöntemin uygulanmasına geçilmiştir. Uydu jeodezisi verilerinin plaka tektoniğine sağladığı ve [12,88]'de ayrıntılı olarak belirtilen önemli katkıları göz önünde tutularak, Türkiye ve çevresindeki tektonik oluşumu ortaya çıkarmak amacıyla, önce WEGENER-MEDLAS (Working Group of European Geoscientists for the establishment of Networks of Earthquake Research - Mediterranean Laser Ranging) projesi kapsamında SLR ve daha sonra da yoğun biçimde GPS ölçüleri yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucu 1989'dan bu yana Türkiye'de yaklaşık 350 noktanın WGS84 (World Geodetic System - 1984) sistemindeki koordinatları GPS ile yüksek doğruluklu olarak belirlenmiş durumdadır. Bunlardan yabancı kurumlarla ortak çalışma ile GPS ölçüsü yapılan noktalar çok genel olarak Şekil-4.8'de görülmektedir.

Bu sayısal uygulamada kullanılmış olan GPS ölçüleri, ETHZ (Eidgenössische Technische Hochschule/İsviçre) ile ortaklaşa yapılmış olan MARMARA94 GPS kampanyasına ilişkindir. 1990 yılında birinci fazı gerçekleştirilmiş olan MARMARA GPS kampanyası, Türkiye Ulusal Jeodezi ve Jeofizik Birliği (TUJJB) - İTÜ- ETHZ arasında imzalanmış olan Uygulama Esasları çerçevesinde 1992 ve 1994 yıllarında tekrar edilmiştir.

1990 ve 1992 yıllarındaki GPS kampanyalarında kullanılan GPS alıcılarının bir özelliği olarak 60 sn aralıklı veri toplandığından ve özellikle ikili faz farkları oluşturulduğunda büyük veri kaybı olması nedeniyle bu çalışmada

amaca daha uygun geldiği için 30 sn aralıklı veri toplanmış olan 1994 ölçüleri kullanılmıştır.

MARMARA94 GPS kampanyası 26 Eylül - 6 Ekim 1994 tarihleri arasında toplam 52 noktada ve ETHZ tarafından sağlanmış 15 adet LEICA System 200 alıcısı kullanılarak yapılmıştır. Ölçülere her gün yerel saatle 16:30'da başlanmış ve gece saat 24:00'de sona erdirilmiştir. Dolayısıyla her gün için yaklaşık 7 saatlik ölçü toplanmıştır. Bu kampanyada ölçü yapılan noktalar listesi Tablo 4.8'de, ölçü planı ise Tablo 4.9'da verilmektedir.

Bu uygulamada Tablo-4.9'da verilen tüm noktalar yerine özellikle GPS ölçülerinin değerlendirilmesi sonrasında güvenilir istatistik analizler yapabilmek için en az üç gün süreyle gözlem yapılmış 14 noktadaki tüm GPS ölçüleri değerlendirilmiştir (Tablo-4.10).

GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde İstanbul Ayazağa (ITAY) noktasının Yığılca SLR noktasına dayalı olarak söz konusu kampanyanın İsviçre'deki genel değerlendirmesi ile daha önce hesaplanan ITRF92 (International Terrestrial Reference Frame - 1992) koordinatları sabit alınmıştır [83],[84]. Tablo-4.10'da verilen farklı yüksekliklerdeki noktalardan uygun bazlar oluşturulmuştur. Değerlendirmelerde 11 ölçü gurubu için toplam 71 baz kullanılmıştır. Bu bazların değerlendirilmesi ise IfAG/ Almanya'da ve Bernese V4.0 yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Değerlendirmelerde aşağıdaki genel stratejiler izlenmiştir ;

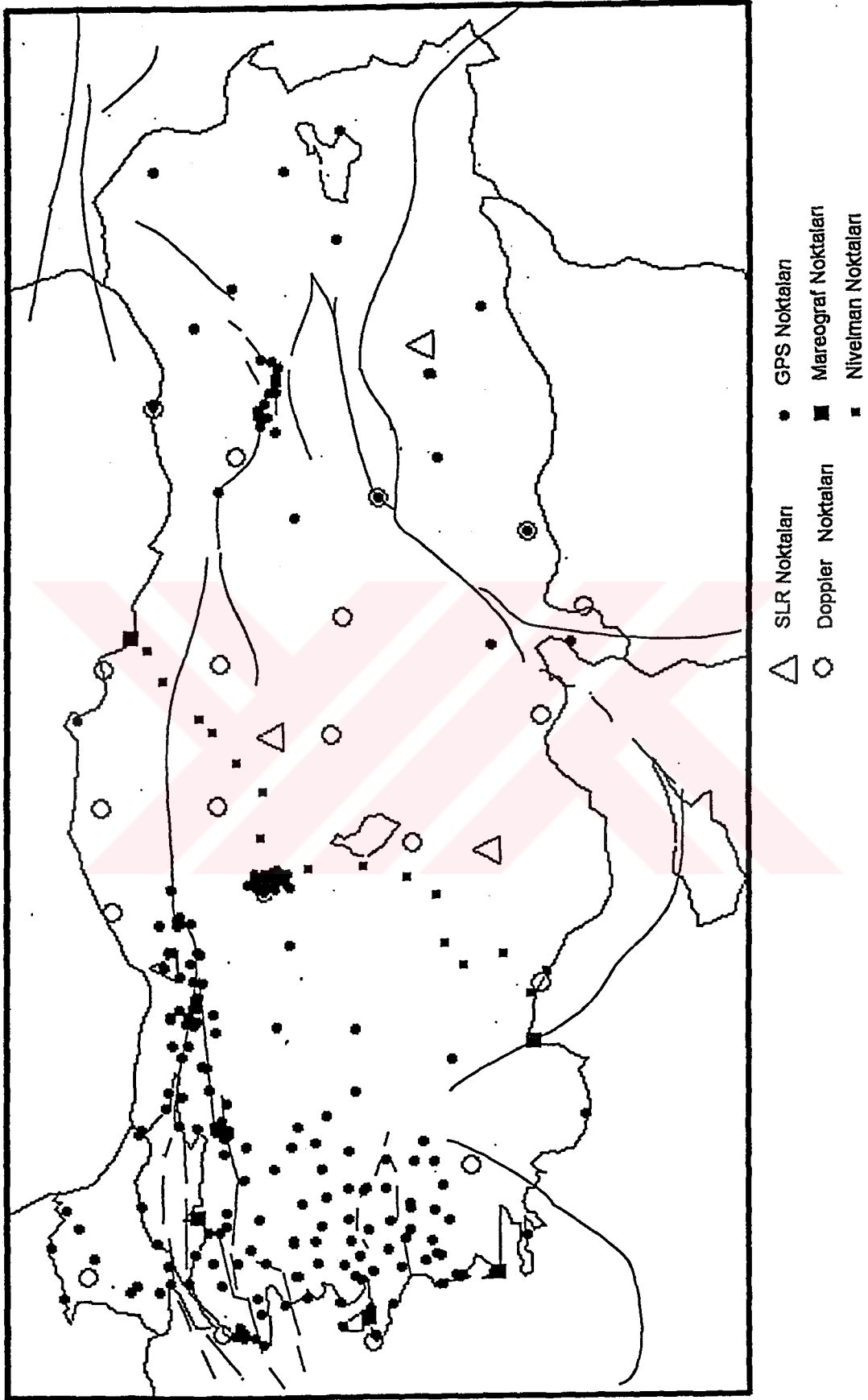
- Farklı arazi yapılarında (düz, dağlık vb.) troposferik etkinin görülebilmesi için yaklaşık eşit ve farklı yüksekliklerdeki seçilmesine dikkat edilmiştir.
- Yukarıda değinildiği gibi, ITAY noktasının ITRF92 koordinatları sabit alınmıştır,
- IGS (International GPS Geodynamics Service) yörünge bilgisi kullanılmış, [29],
- Taşıyıcı dalga faz belirsizliklerinin (Ambiguity) yaklaşık tamamı çözülmüştür,
- Olası yansıma (multipath) etkisini en aza indirmek için minimum uydu yükseklik açısı 20 derece alınmış,
- Değerlendirmelerde iyonosferden bağımsız lineer kombinasyon (L3) kullanılmış,
- Troposferik etki hesabında "Saastamoinen" modeli kullanılmıştır.

Değerlendirmelerde kullanılan bazlar toplu halde Şekil-4.9'da gösterilmektedir.

Troposferik etkinin hesabında Tablo-4.11'de verilen yöntemler uygulanmıştır. Değerlendirmelerde mutlak troposferik hata için $\sigma_{abs} = 0.05$ m, görel troposferik hata için $\sigma_{rel} = 0.020$ m sınırlama (constraint) konulmuştur. Zaman - bağımlı stokastik modellendirmede ise $\sigma_{rel} = 0.005$ m sınırlama konulmuştur.

Değerlendirmelere ilişkin sonuçlar sırasıyla Tablo-4.12 ve 4.13'de verilmektedir. Bu tablolarda verilen yükseklik farkları ve baz uzunlukları, hesaplamalarda sabit olarak alınan ITAY noktasına göredir. ITAY noktasının ITRF92 sisteminde hesaplanmış olan kordinatları aşağıda verilmiştir.

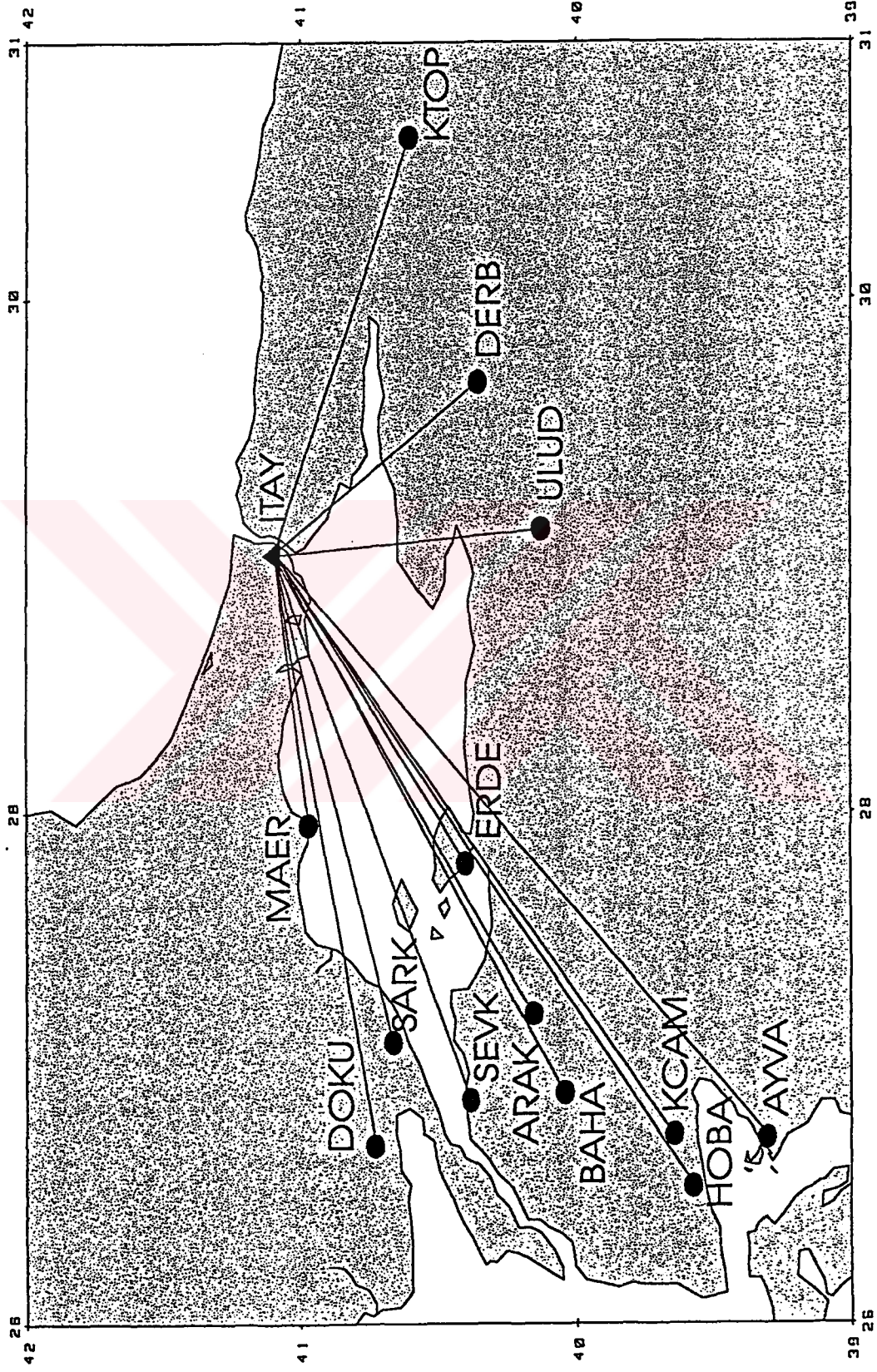
$$\begin{aligned} X_{ITAY} &= 4208814.5948 \text{ m} \\ Y_{ITAY} &= 2334874.6544 \text{ m} \\ Z_{ITAY} &= 4171267.2330 \text{ m} \\ h_{ITAY} &= 145.7823 \text{ m} \end{aligned}$$



Şekil-4.8. Türkiye'de GPS Ölçüsü Yapılan Noktalar (1988-1994)

Tablo-4.8. MARMARA94 Kampanyasında GPS Ölçüsü Yapılan Noktalar

Nokta No	Nokta Adı	4-KARAKTER Nokta Adı	Enlem	Boylam	Elipsoit Yük. (m)
001	Ayazağa/İST.	ITAY	41 06	29 01	150
002	Kandilli	IKAN	41 04	29 04	135
101	Yeniköy	YENI	40 49	27 24	300
102	Şarköy	SARK	40 40	27 06	250
103	Hewith	HEMI	40 59	26 47	300
104	Dokuzdere	DOKU	40 44	26 42	130
105	Kavak	KVAK	40 36	26 52	50
106	Şevketiye	SEVK	40 24	26 53	80
107	Marm.Ereğlisi	MAER	40 58	27 57	40
201	Tepebaşı	TEBA	40 23	30 48	980
202	Pınarbaşı	PINA	40 33	30 52	800
203	Boztepe	BOZT	40 33	30 41	820
204	Kuzuluk	KTOP	40 37	30 38	240
205	Aksar T.	AKTE	40 39	30 38	210
206	Kuzuluk-Kapl.	KKAP	40 38	30 39	160
207	Keremali	KMAL	40 39	30 45	1200
208	Kazımiye	KZIM	40 50	30 43	350
209	Karadere	KDER	40 44	30 50	650
301	Ezine	EZIN	39 47	26 19	150
302	Körüktaş	KRKT	39 44	26 13	200
303	Kestanbol	KEST	39 44	26 09	80
304	Babadere	BDER	39 37	26 11	250
305	Aklıman	AMAN	39 30	26 05	180
306	Hasanoba	HOBA	39 35	26 32	480
307	Karaçam T.	KCAM	39 39	26 44	1280
308	Ayvalık	AYVA	39 20	26 42	120
309	Eğmir	EGMI	39 35	27 16	260
310	Esentepe	ESEN	39 05	26 50	250
DEU35	Kozak	35DU	39 14	27 07	600
DEU37	Kumköy	37DU	39 18	27 36	300
401	Oluklu	OLUK	40 40	29 35	400
402	Derbent	DERB	40 22	29 41	600
403	Hamzabey	HMZA	40 10	29 31	310
404	Çataltepe	CATA	40 12	29 16	360
405	Girencik	GIRE	39 56	28 55	460
406	Yığıtali	YIGI	40 10	29 01	670
407	Zeyniler	ZEYA	40 10	29 07	820
408	Uludağ	ULUD	40 08	29 06	1670
409	Demirtaş	DTAS	40 16	29 06	160
410	Hasanağa	HAGA	40 10	28 47	200
411	İğdir	IGDI	40 16	29 12	180
412	Gemlik	GEML	40 28	29 09	410
413	Gaziler T.	GAZI	40 49	29 25	350
415	Çınarcık	CINA	40 40	29 10	200
501	Alancık	ALAN	39 47	27 25	610
502	Kireç T.	KIRE	39 54	27 13	970
503	Bahadırılı	BAHA	40 02	26 55	260
504	Akkayrak	ARAK	40 10	27 13	80
505	Karabiga	KABI	40 23	27 18	50
506	Ulukır	UKIR	40 15	27 38	150
507	Koçbayır	KOCB	40 04	27 46	420
508	Erdek	ERDE	40 24	27 49	90
414	Hereke	YUHE	40 48	29 38	380



Şekil-4.9. Değerlendirmede Kullanılan Bazılar

Tablo 4.9. MARMARA94 GPS Kampanyası Ölçü Planı

TARİH (Ölçü Günü)	EKİP 1	EKİP 2	EKİP 3	EKİP 4	EKİP 5	EKİP 6	EKİP 7	EKİP 8	EKİP 9	EKİP 10	EKİP 11	EKİP 12	EKİP 13	EKİP 14	EKİP 15
26.09.1994 (269)	001	—	201	308	107	402	205	204	408	206	208	202	203	209	207
27.09.1994 (270)	001	104	201	308	107	402	205	204	408	206	208	202	203	209	207
28.09.1994 (271)	001	104	403	308	413	402	206	409	408	411	414	412	401	404	415
29.09.1994 (272)	001	104	403	308	413	407	206	409	408	411	414	412	401	404	415
30.09.1994 (273)	001	104	507	308	405	407	206	504	408	505	406	503	410	506	508
01.10.1994 (274)	001	104	507	308	405	502	206	504	408	505	406	503	410	506	508
02.10.1994 (275)	001	104	307	335	501	502	206	504	310	308	337	503	508	306	309
03.10.1994 (276)	001	104	307	335	501	304	206	301	310	308	337	305	508	306	309
04.10.1994 (277)	001	105	307	104	302	304	206	503	102	308	303	305	508	306	106
05.10.1994 (278)	001	105	107	104	305	103	206	302	102	308	303	101	508	505	106
06.10.1994 (279)	001	105	107	104	408	103	206	508	102	308	415	101	414	505	106

Tablo 4.10. Değerlendirmede Kullanılan Noktalar

TARİH (Ölçü Günü)	4 - KARAKTER KISALTILMIŞ NOKTA ADI										
26.09.1994 (269)	ITAY	AYVA	ULUD	DERB	--	KTOP	--	--	--	--	--
27.09.1994 (270)	ITAY	AYVA	ULUD	DERB	--	KTOP	--	--	--	--	--
28.09.1994 (271)	ITAY	AYVA	--	DERB	DOKU	KTOP	--	--	--	--	--
29.09.1994 (272)	ITAY	AYVA	ULUD	DERB	DOKU	KTOP	--	--	--	--	--
30.09.1994 (273)	ITAY	AYVA	ULUD	--	DOKU	KTOP	ARAK	BAHA	ERDE	--	--
01.10.1994 (274)	ITAY	AYVA	ULUD	--	DOKU	KTOP	ARAK	BAHA	ERDE	--	--
02.10.1994 (275)	ITAY	AYVA	--	--	DOKU	KTOP	ARAK	BAHA	ERDE	HOBA	KCAM
03.10.1994 (276)	ITAY	AYVA	--	--	DOKU	KTOP	--	--	ERDE	HOBA	KCAM
04.10.1994 (277)	ITAY	AYVA	--	--	DOKU	KTOP	--	BAHA	ERDE	HOBA	KCAM
05.10.1994 (278)	ITAY	AYVA	--	--	DOKU	KTOP	--	--	--	--	--
06.10.1994 (279)	ITAY	AYVA	--	--	DOKU	KTOP	--	--	ERDE	--	--

Tablo-4.11. Troposferik Etki Hesabında Kullanılan Yöntemler

YÖNTEM	TANIMI
A	Troposferik Model Yok
B	Standart Atmosferik Model (Zenit Parametresi Hesaplanmıyor)
C	Her Nokta ve Ölçü Grubu (Session) İçin Bir Zenit Parametresi Hesabı
D	Her Nokta ve Ölçü Grubu İçin 4 Saatte Bir Zenit Parametresi Hesabı
E	Her Nokta ve Ölçü Grubu İçin 30 Dakikada Bir Parametre Hesabı (Stokastik Model)
F	Arazide Ölçülmüş Meteorolojik Veriler (SM) Yardımıyla Standart Atmosferik Model (Zenit Parametresi Hesaplanmıyor)
G	Arazide Ölçülmüş Meteorolojik Veriler (SM) Yardımıyla Her Nokta ve Ölçü Grubu İçin Bir Zenit Parametresi Hesabı
H	Arazide Ölçülmüş Meteorolojik Veriler (SM) Yardımıyla Her Nokta ve Ölçü Grubu İçin 4 Saatte Bir Zenit Parametresi Hesabı
I	Arazide Ölçülmüş Meteorolojik Veriler (SM) Yardımıyla Her Nokta ve Ölçü Grubu İçin 30 Dakikada Bir Zenit Parametresi Hesabı (Stokastik Model)

Tablo-4.12. Değişik Modellendirmeler ile Kampanya Çözümleri Özeti; Yükseklik Farkı(m)

	TAM SAYI	YÖNTEM								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
ITAY-AYVA	29.	3057	2743	2455	2471	2456	1999	2477	2448	2446
ITAY-DERB	-442.	6116	9752	9756	9684	9717	-1.0074	9681	9687	9698
ITAY-KTOP	-79.	9862	-1.1880	-1.1635	-1.1640	-1.1650	-1.2282	-1.1629	-1.1626	-1.1635
ITAY-MAER	106.	4169	4717	5086	5035	4983	3185	5123	5017	5013
ITAY-ULUD	-1521.	6167	-1.7220	-1.7550	-1.7552	-1.7571	-1.7400	-1.7517	-1.7555	-1.7572
ITAY-DOKU	13.	8565	8142	8673	8673	8662	7191	8706	8664	8674
ITAY-ARAK	65.	7534	7486	7846	7771	7748	6768	7858	7785	7772
ITAY-BAHA	-112.	7781	9378	8948	9038	9053	9889	9005	9015	9041
ITAY-ERDE	66.	8944	9252	9277	9258	9238	8253	9263	9256	9251
ITAY-HOBA	-336.	6397	9714	9000	8991	9018	-1.0283	9009	9021	9011
ITAY-KCAM	-1130.	1372	-1.0265	9664	9654	9670	-1.0410	9670	9692	9672
ITAY-SARK	-107.	0117	1556	0878	0911	0942	2213	0858	0951	0917
ITAY-SEVK	70.	7854	7862	8358	8342	8309	7353	8386	8300	8326

Tablo-4.13. Değişik Modellendirmeler ile Kampanya Çözümleri Özeti; Baz Uzunluğu (m)

	TAM SAYI	YÖNTEM								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
ITAY-AYVA	278753.	8487	4982	4949	4965	4984	4820	4920	4906	4856
ITAY-DERB	99647.	7199	5757	5754	5758	5760	5687	5729	5716	5701
ITAY-KTOP	146910.	1.1227	9618	9596	9605	9614	9540	9582	9575	9553
ITAY-MAER	90337.	1684	0420	0389	0399	0410	0360	0382	0374	0353
ITAY-ULUD	107823.	4275	3032	3021	3026	3034	2966	3011	2995	2976
ITAY-DOKU	199019.	1.1638	9039	8999	9011	9027	8926	8979	8969	8934
ITAY-ARAK	184588.	6372	4065	4031	4039	4048	3944	4009	3991	3960
ITAY-BAHA	214841.	9408	6751	6711	6720	6735	6604	6681	6662	6633
ITAY-ERDE	128224.	7749	6086	6053	6070	6084	6013	6050	6041	6020
ITAY-HOBA	270586.	4114	0795	0771	0783	0795	0660	0756	0740	0693
ITAY-KCAM	252401.	6975	3974	3953	3964	3975	3834	3933	3921	3877
ITAY-SARK	169059.	4643	2366	2306	2324	2352	2260	2297	2307	2266
ITAY-SEVK	197101.	3571	0949	0883	0907	0935	0838	0880	0890	0835

Yukarıda farklı yöntemlerle hesaplanan troposferik parametreler sonucu elde edilen nokta yüksekliklerinin (veya yükseklik farklarının) doğruluklarının güvenilir bir şekilde kontrolü için bu sonuçları;

- ya arazide yersel yöntemlerle (örneğin, geometrik nivelman) ölçülmüş ve hesaplanmış sonuçlarla karşılaştırmak,
- veya SLR ve VLBI gibi yüksek doğruluklu tekniklerle belirlenen sonuçlarla karşılaştırmak, ya da
- aynı günlere ait WVR verileri ile yapılacak çözümlerle karşılaştırmak gerekmektedir

Ancak, söz konusu noktalar için yukarıda belirtilen hiç bir veri ya da sonuç mevcut değildir. Dolayısıyla, bu çalışmada elde edilen sonuçların yalnızca iç duyarlıkları ile ilgili bazı hesaplamalar yapılmıştır. Bunun için günümüzde yaygın olarak kullanılan yöntem kısa dönemli tekrarlanabilirlik (short term repeatability) hesaplamalarıdır. GPS ölçülerinin değerlendirilmesi sonucu elde edilen günlük çözümler arasında ve bu günlük çözümler ile kampanya çözümü arasındaki uyum derecesi

$$S = \left[\frac{\frac{N}{N-1} \sum_{i=1}^N \frac{(R_i - [R])^2}{\sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i^2}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.16)$$

bağıntısı ile belirlenmektedir [85]. Burada,

N : baz ya da baz bileşenlerinin ölçüldüğü gün sayısı

R_i : i 'nci güne ait baz bileşenlerinin hesaplanmış değeri

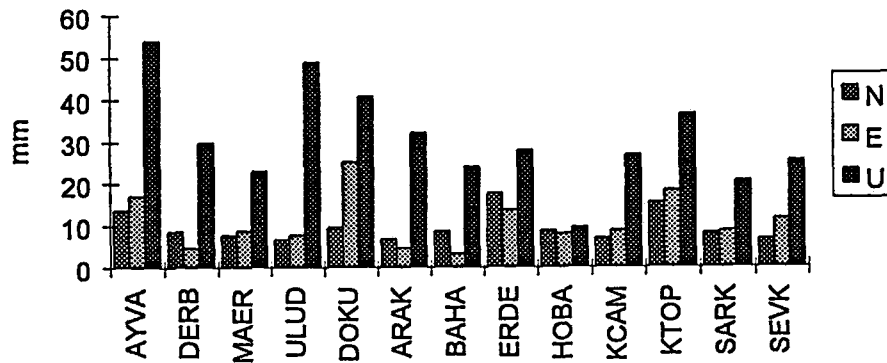
$[R]$: Bernese V4.0 yazılımı ile kampanya çözümü sonucunda elde edilen değerlerin ağırlıklı ortalamasıdır.

σ_i : i 'nci güne ilişkin baz bileşenlerinin standart sapmasıdır.

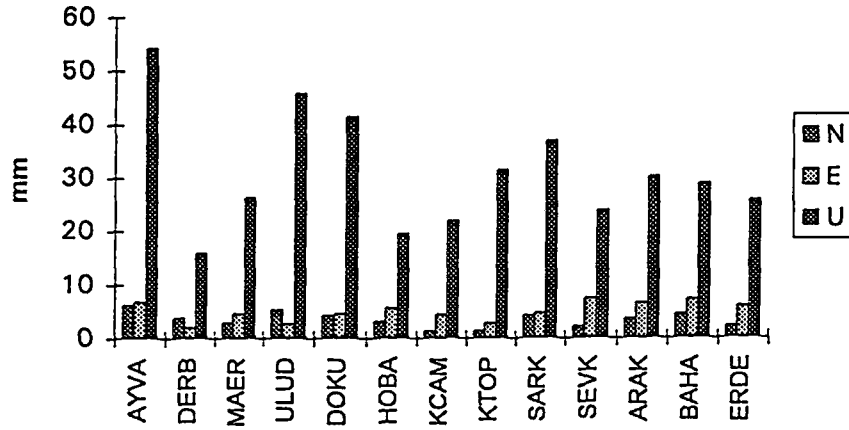
Bernese V4.0 yazılımı kullanılarak yapılan çözümlerin tekrarlanabilirlik hesaplamaları Tablo-4.11'de verilen her yöntem için 3 farklı şekilde ve ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Diğer bir ifadeyle bu hesaplamalar,

- Her yöntemde hesaplanan nokta yüksekliklerinin genel (kampanya) çözüme göre olan tekrarlanabilirlikleri,
- Her yöntem için günlük çözümlerin genel çözüme göre olan tekrarlanabilirlikleri,
- Her yöntem için hesaplanan bazların genel çözüme göre olan tekrarlanabilirlikleri şeklinde yapılmıştır.

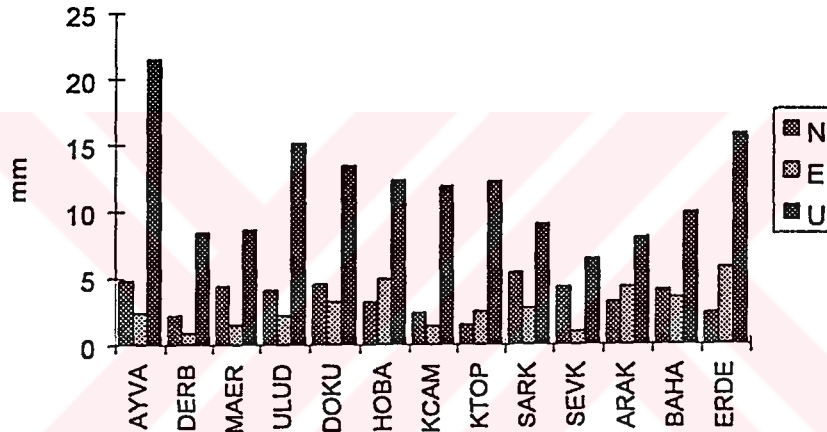
Sonuçların irdelenmesini kolaylaştırmak amacıyla hesaplanan değerler sayısal değerler olarak değil, grafik gösterimler olarak sunulmuştur. Bu grafikler, koordinat tekrarlanabilirlikleri için Şekil-4.10 - 4.18'de, günlük çözümlerin genel (kampanya) çözüme göre uyum derecesi Şekil-4.19 - 4.27'de, baz tekrarlanabilirlikleri ise Şekil-4.28 - 4.37'de gösterilmektedir. Bu grafiklerde N;enlem, E;boylam ve U;elipsoit yüksekliğini ifade etmektedir.



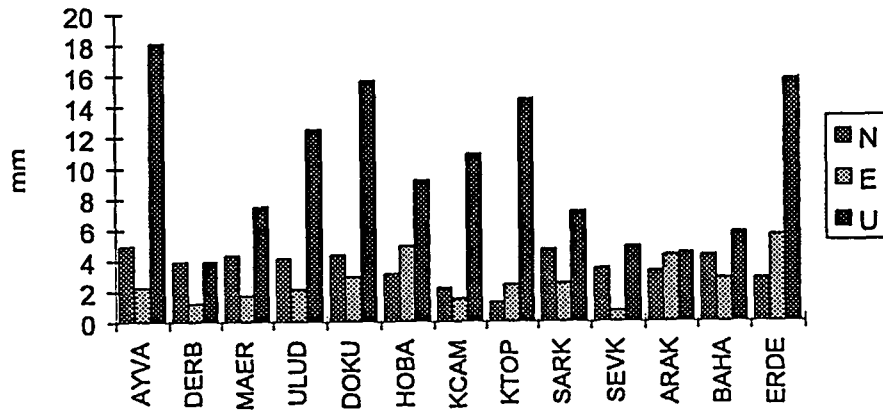
Şekil-4.10. Yöntem A, Koordinat tekrarlanabilirliği



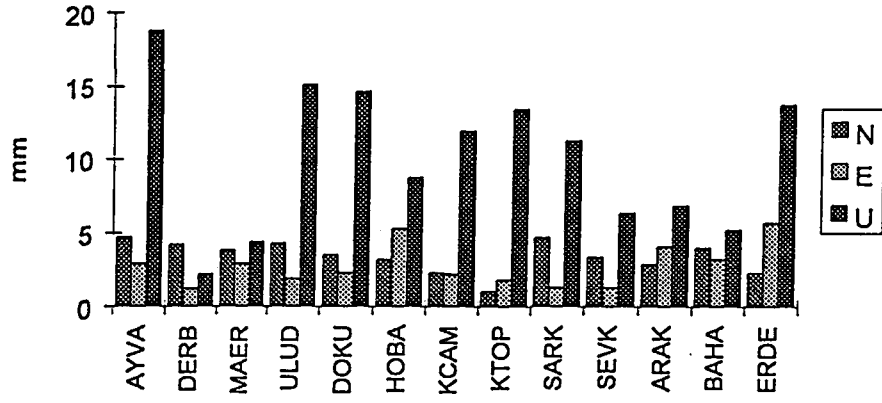
Şekil-4.11. Yöntem B, Koordinat tekrarlanabilirliği



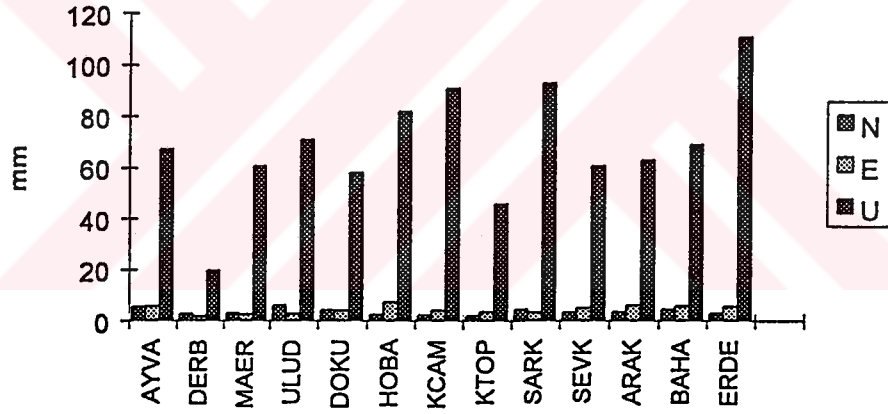
Şekil-4.12. Yöntem C, Koordinat tekrarlanabilirliği



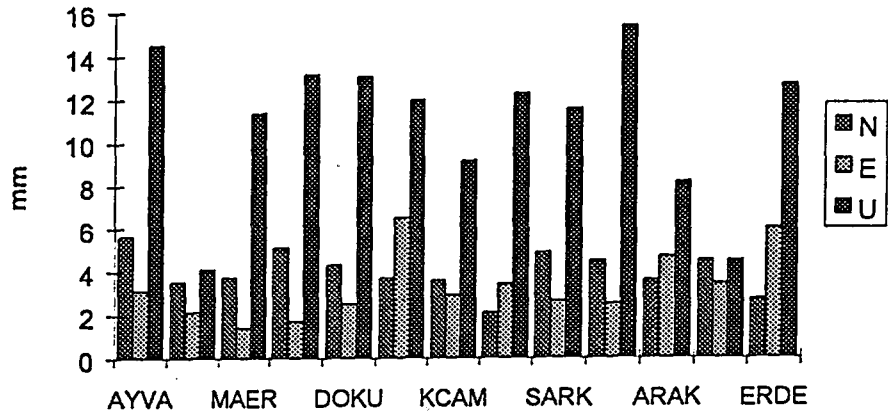
Şekil-4.13. Yöntem D, Koordinat tekrarlanabilirliği



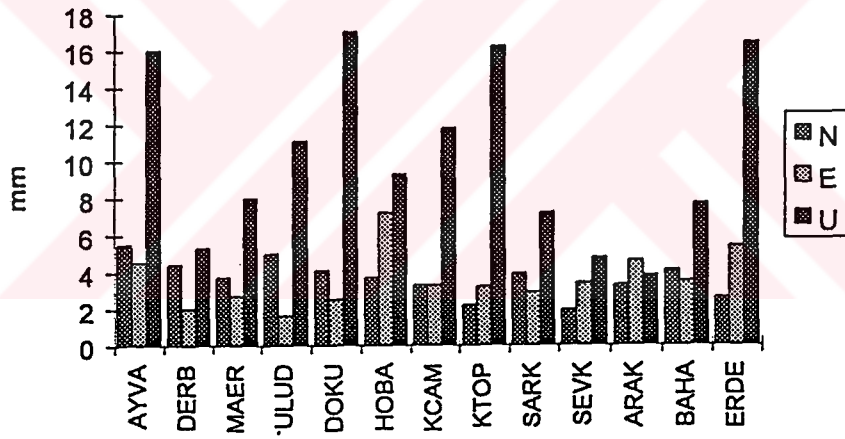
Şekil-4.14. Yöntem E, Koordinat tekrarlanabilirliği



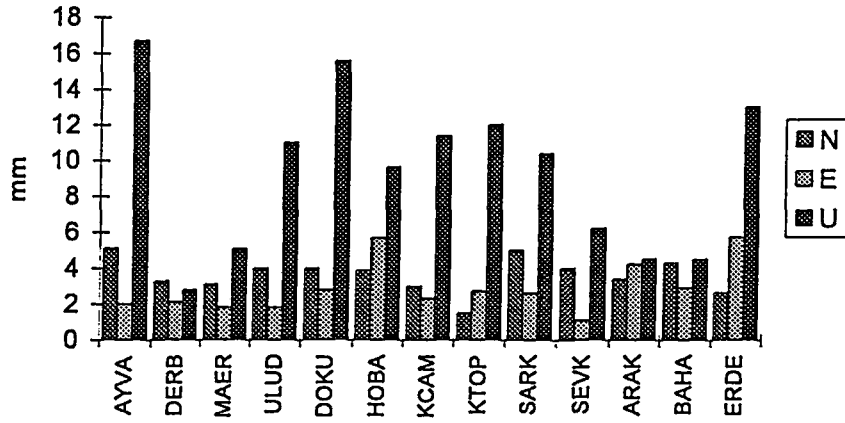
Şekil-4.15. Yöntem F, Koordinat tekrarlanabilirliği



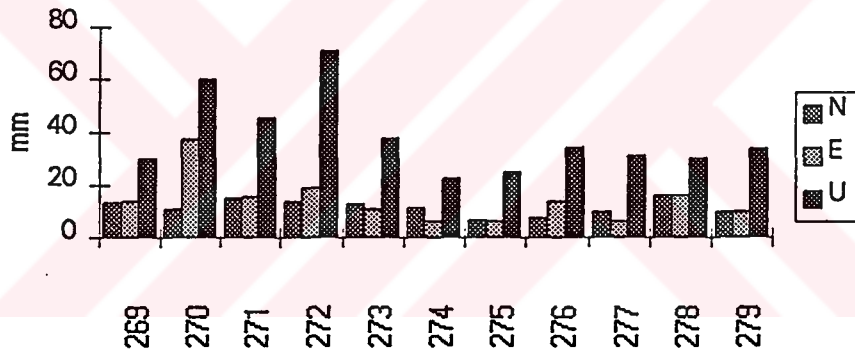
Şekil-4.16. Yöntem G, Koordinat tekrarlanabilirliği



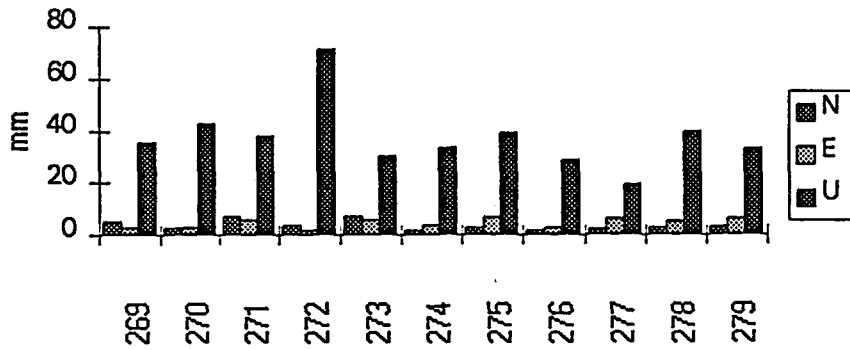
Şekil-4.17. Yöntem H, Koordinat tekrarlanabilirliği



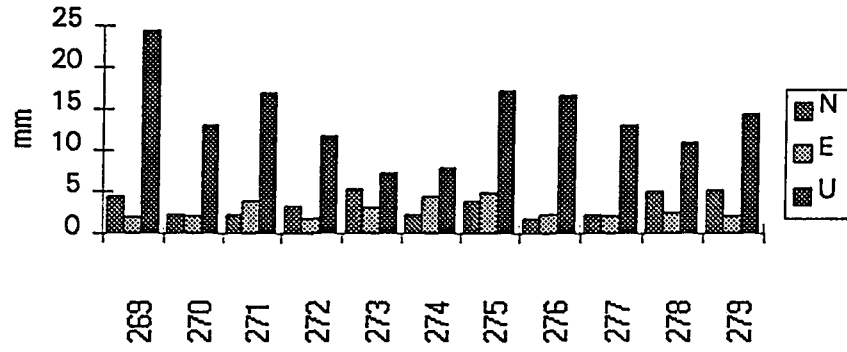
Şekil-4.18. Yöntem I, Koordinat tekrarlanabilirliği



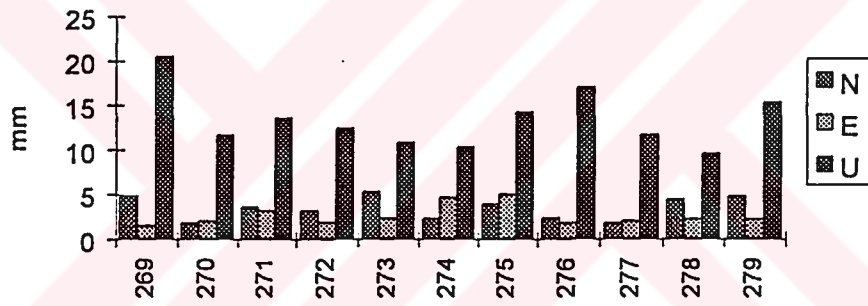
Şekil-4.19. Yöntem A, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu



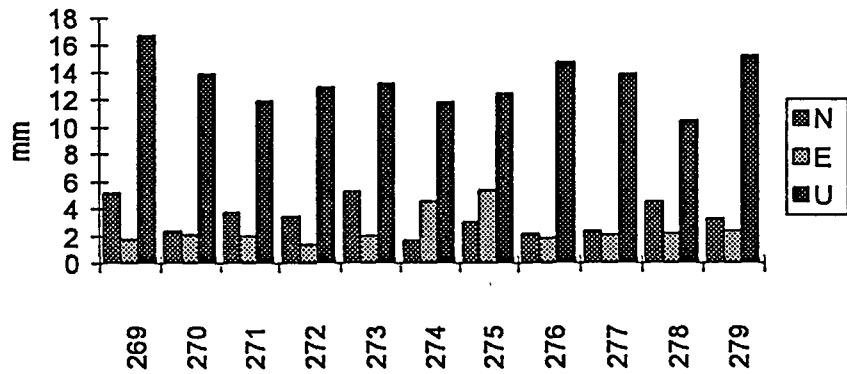
Şekil-4.20. Yöntem B, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu



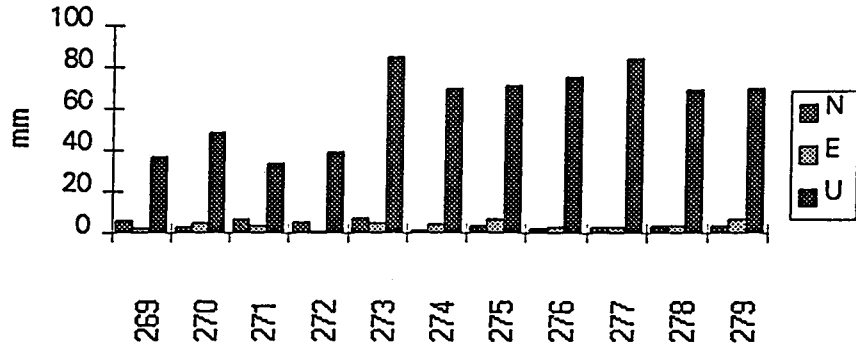
Şekil-4.21. Yöntem C, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu



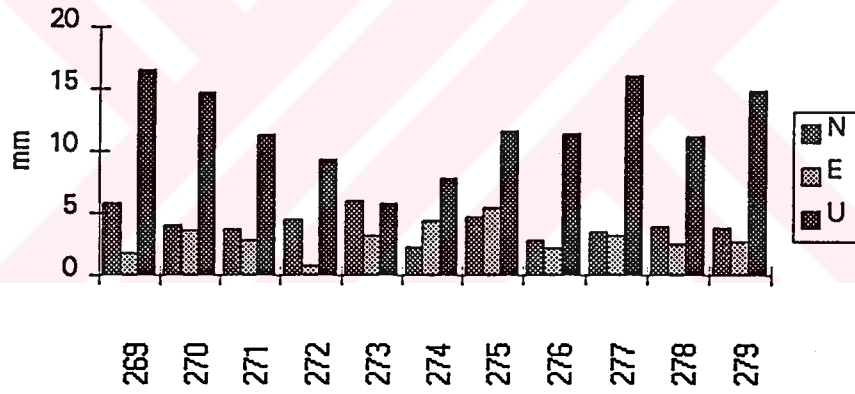
Şekil-4.22. Yöntem D, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu



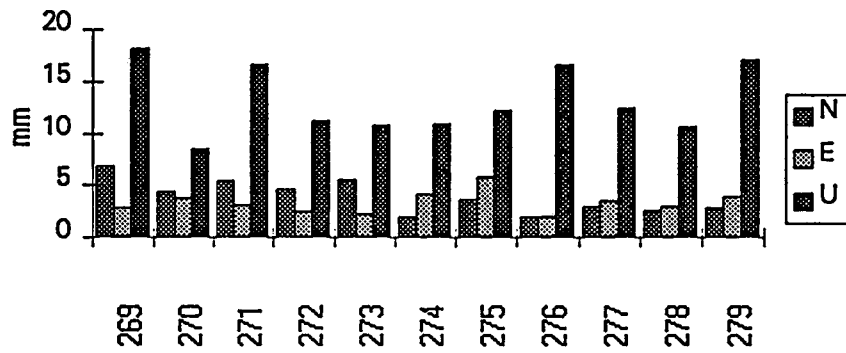
Şekil-4.23. Yöntem E, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu



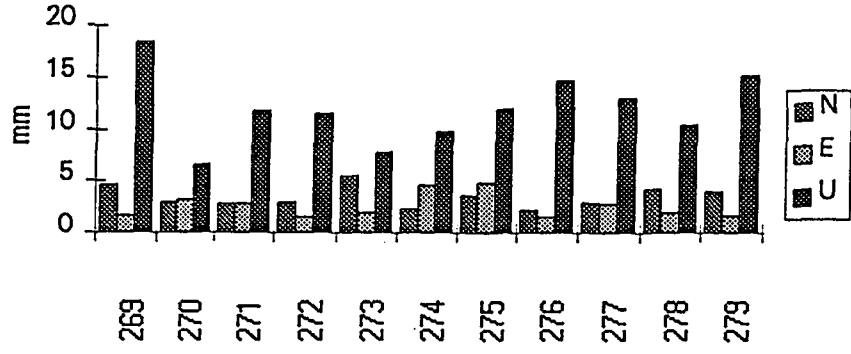
Şekil-4.24. Yöntem F, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu



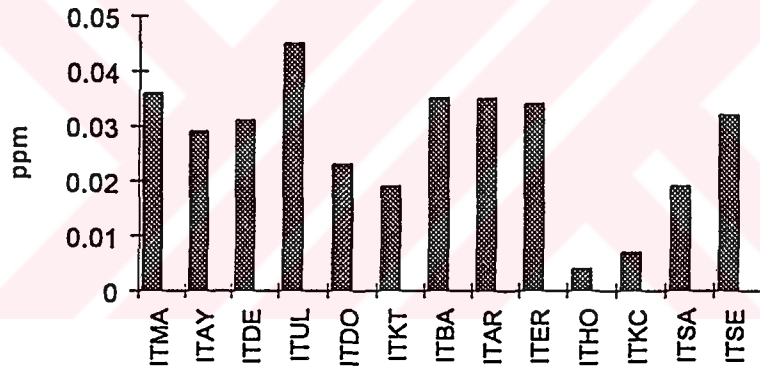
Şekil-4.25. Yöntem G, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu



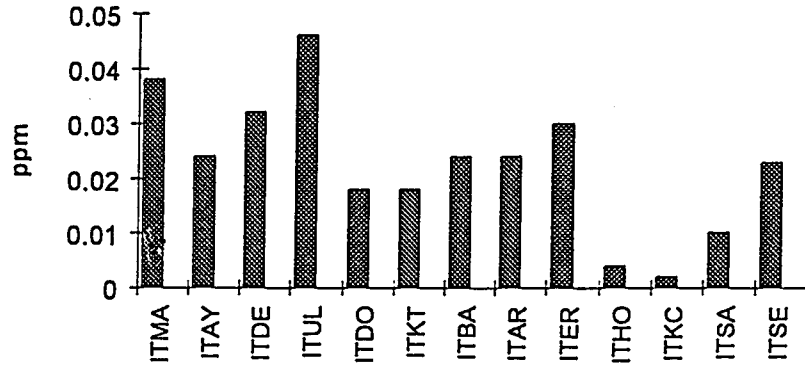
Şekil-4.26. Yöntem H, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu



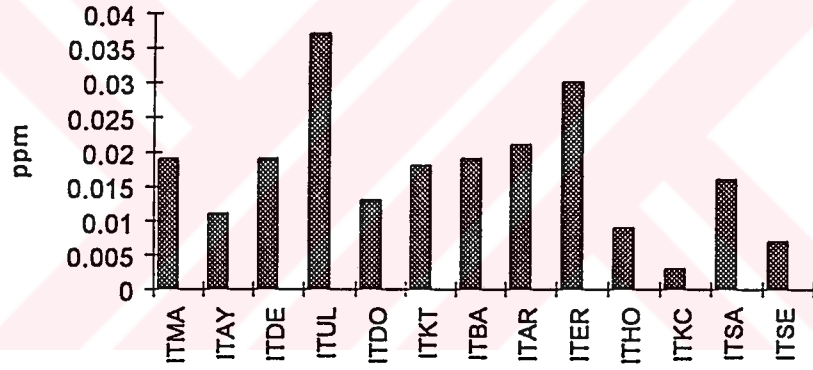
Şekil-4.27. Yöntem I, Günlük Çözümlerin Genel Çözümüne Uyumu



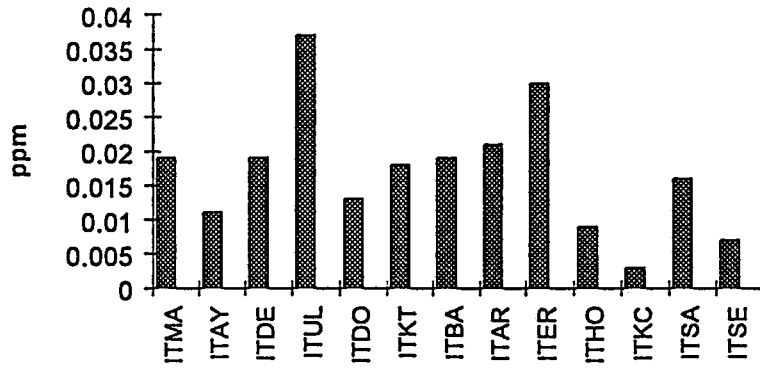
Şekil-4.28. Yöntem A, Baz Tekrarlanabilirliği



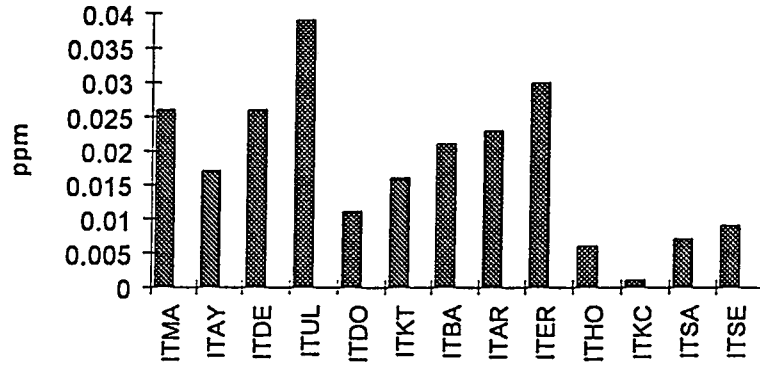
Şekil-4.29. Yöntem B, Baz Tekrarlanabilirliği



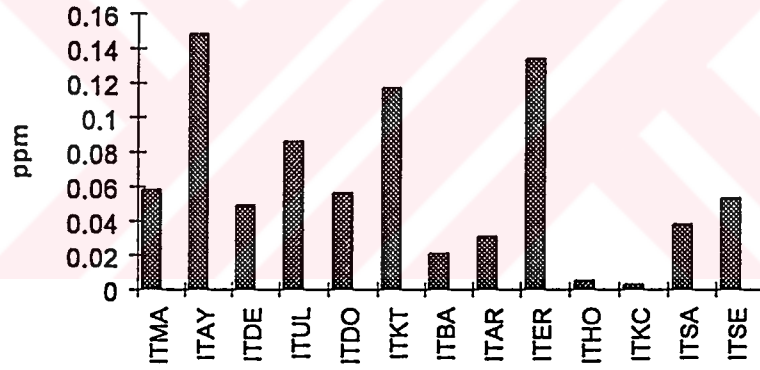
Şekil-4.30. Yöntem C, Baz Tekrarlanabilirliği



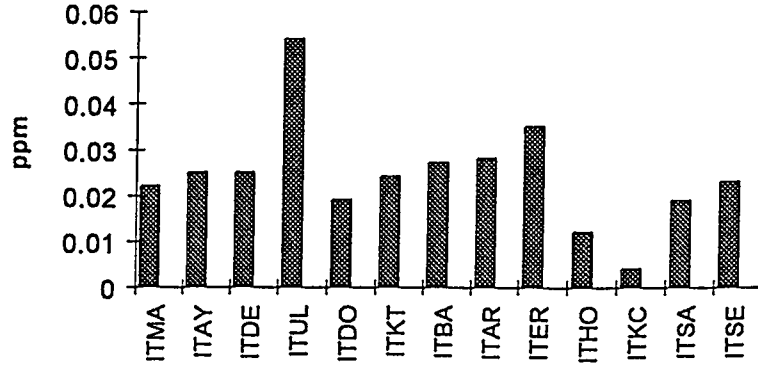
Şekil-4.31. Yöntem D, Baz Tekrarlanabilirliği



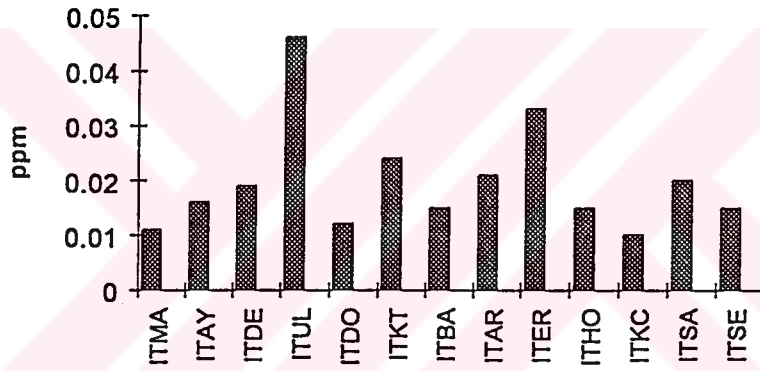
Şekil-4.32. Yöntem E, Baz Tekrarlanabilirliği



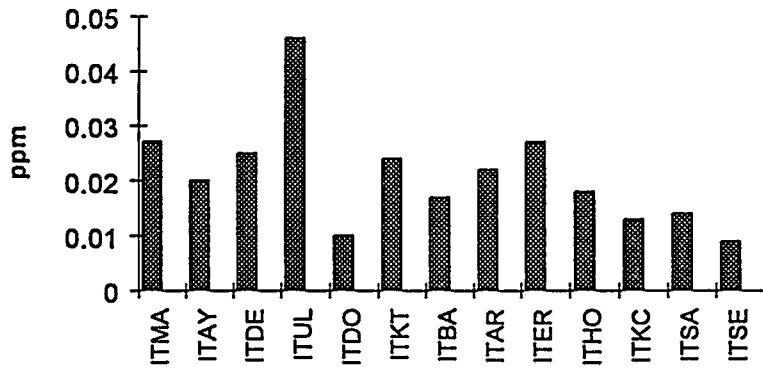
Şekil-4.33. Yöntem F, Baz Tekrarlanabilirliği



Şekil-4.34. Yöntem G, Baz Tekrarlanabilirliği

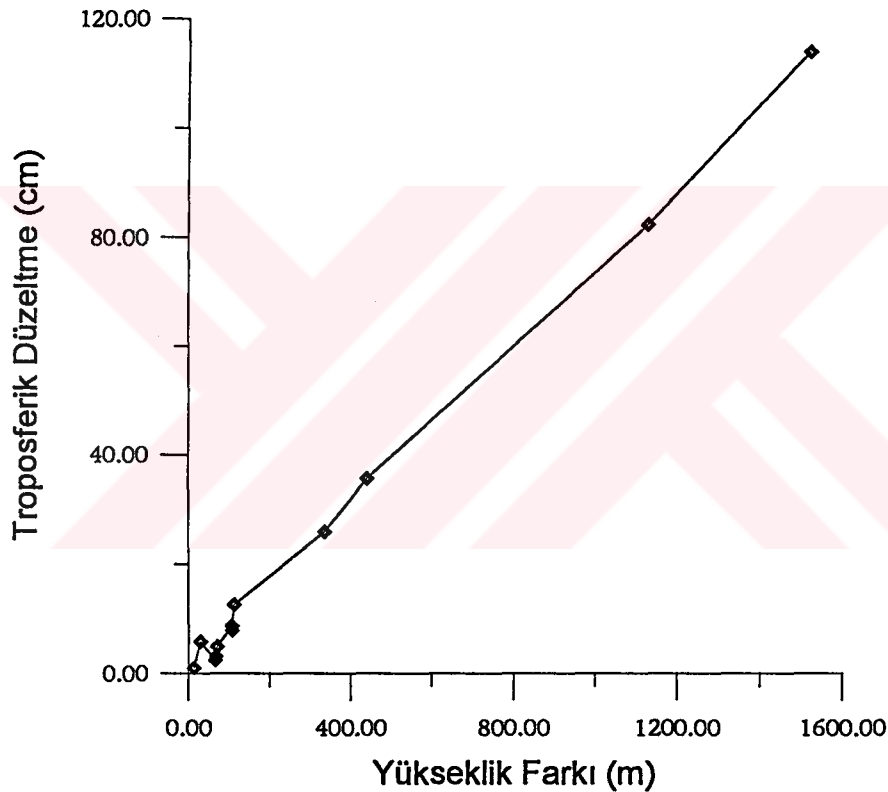


Şekil-4.35. Yöntem H, Baz Tekrarlanabilirliği



Şekil-4.36. Yöntem I, Baz Tekrarlanabilirliği

Şekil-4.10 ve 4.19'da gösterilen, Yöntem A'ya ilişkin sonuçlar; dikkate alınmayan bir troposferik etkinin özellikle nokta yüksekliklerinin hesaplanmasında neden olabileceği sistematik hatanın büyüklüğü hakkında bir fikir vermektedir. Söz konusu grafikler incelendiğinde özellikle nokta yükseklik farklarındaki değişimin yaklaşık 3-7 cm civarında olduğu görülmektedir. Bu ise, jeodezik ve jeodinamik amaçlı çalışmalar için oldukça önemli bir hata kaynağıdır. Örneğin, tablo-4.12'den yararlanarak bir grafik çizildiğinde (Yöntem A-Yöntem E), troposferik etkiden dolayı hesaplanan yükseklik farkına gelen düzeltme miktarının yaklaşık olarak her 100 m için 8 cm civarında olduğu görülmektedir, Şekil-4.37.



Şekil-4.37. Yükseklik Farkı-Troposferik Düzeltme ilişkisi

Diğer yöntemlere ilişkin grafiklerin karşılaştırılmaları meteorolojik parametreler (SM) kullanılarak ve kullanılmadan yapılan çözümler şeklinde irdelendiğinde aşağıdaki sonuçlara ulaşmak olanaklıdır.

Yöntem B'ye ilişkin Şekil-4.11 ve 4.20 ile Yöntem F'ye ilişkin Şekil-4.15 ve 4.24 irdelendiğinde, hiçbir zenit parametresi hesaplamadan, yalnızca

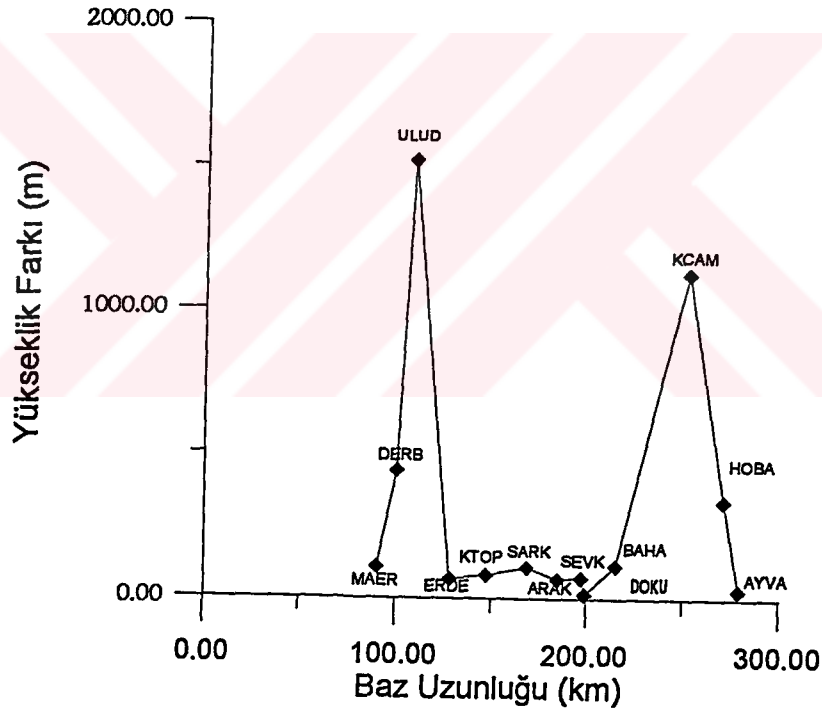
standart atmosferden dolayı mevcut olan troposferik düzeltmenin hesaplanmasında, SM değerleri kullanılmadan elde edilen çözümlerin SM değerleri kullanılarak elde edilen çözümlere göre daha iyi tekrarlanabilirlik değerleri verdiği görülmektedir. Bu sonucun, günlük GPS değerlendirme uygulamalarındaki önemi çok büyüktür. Çünkü, şu anda mevcut ticari amaçlı GPS ölçülerini değerlendirme yazılımlarının büyük bölümü arazide ölçülmüş meteorolojik verileri kullanmak yerine standart atmosfer modeli (zenit gecikmeleri hesaplanmadan) ile çözümü tercih etmektedir. Dolayısıyla, bu yazılımlarla hesaplanan yükseklik farklarının doğruluğu bir çok uygulama için yeterli olmaktadır. Bu grafiklerdeki değerlere göre, söz konusu yazılımlarla yapılan değerlendirmelerde iç doğruluğun nokta yüksekliklerinde 2 ile 7 cm arasında, enlem ve boylamda ise 1 cm'nin altında olacağı umulmaktadır.

Bu yöntemlerin dışındaki, standart modelden olan sapmaların zenit parametreleri hesaplanarak belirlenmesine yönelik yöntemler (Yöntem C, D, E, G, H ve I) arasında önemli bir fark olmadığı görülmüştür. Başka bir deyişle zenit parametreleri hesaplandığı sürece bu yöntemlerden hangisinin kullanılacağı önemsiz olmaktadır. Burada, arazide ölçülmüş gerçek meteorolojik verilerle elde edilen sonuçlar ile standart model kullanılarak elde edilen sonuçlar arasında bölüm (4.3.1)'de anlatılanların aksine daha iyi bir uyum elde edilmiştir. Ancak, bunun bir çelişki olmadığı düşünülmektedir. Çünkü, bu çalışmada kullanılan baz uzunlukları yaklaşık 100-300 km arasındadır. Dolayısıyla, hesaplanan parametrelerin etkisi baz uzunluğu ile orantılı olarak azalmaktadır, böylece sonuçlarda iyi bir tekrarlanabilirlik elde edilmektedir. Oysa, bölüm (4.3.1)'de de belirtildiği gibi kısa kenarlı ağlarda, özellikle noktalar arasındaki yükseklik farkının büyük olması durumunda, aynı derecede uyumlu sonuçların elde edilemeyeceği düşünülmektedir. Sonuç olarak, koordinat tekrarlanabilirliği ile ilgili grafikler irdelendiğinde, aradaki farkların birkaç mm mertebesinde olmasına karşın en uyumlu (smooth) sonuçların zaman bağımlı stokastik model (yöntem E) kullanılarak elde edildiği değerlendirilmektedir. Değerlendirmede kullanılan noktalar arasındaki baz uzunlukları ile bunların ITAY noktasına göre olan yükseklik farkları arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil-4.38'de verilmektedir.

Diğer taraftan, uluslararası projeler gereği Türkiye'nin farklı bölgelerinde (Kuzey Anadolu Fay Hattı 1990 ve 1991 yılları, Ankara GPS Test Ağı ve Marmara 92) yapılan GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde de gerçek meteorolojik değerler kullanılarak yapılan değerlendirmelerde, bu değerler

kullanılmadan yapılan değerlendirmelere göre birkaç kat daha kötü sonuçlar alınmıştır. Oysa bu çalışmada daha uyumlu sonuçlar alınmıştır. Bunun nedeni olarak bu kampanyada kullanılan meteorolojik aletlerin diğer kampanyalarda kullanılan meteorolojik aletlere göre daha presizyonlu olduğu ve ayrıca diğer kampanyalarda kullanılan aletlerin kalibrasyonunun yapılmadığı, bu kampanyada kullanılan aletlerin gerekli kalibrasyonlarının ise yapılmış olduğu dşnlmektedir.

Nitekim, benzer çalışmalar farklı araştırmacılar tarafından da yapılmış olup, genelde gerçek meteorolojik değerlerin daha kötü sonuçlar verdiği belirtilmiştir [31-45,66,68,70,73,82,83, 86].



şekil-4.38. Yükseklik Farkı-Baz Uzunluğu İlişkisi

Troposferik etkinin baz uzunluklarında neden olduğu değişimi şekil 4.28 - 4.35'de verilen grafiklerden görmek olanaklıdır. Bu grafikler incelendiğinde, hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın, troposferik etkinin dikkate alındığı durumlarda baz uzunluklarındaki değişimin göz ardı edilebilecek kadar az olduğu görülmektedir.

Bu grafiklerden elde edilen bir diğer sonuç ise, GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde baz doğrulukları 0.002 ppm ile 0.04 ppm arasında değişmektedir. Bu rakamlar bu ölçülerin değerlendirilmesinde önemli bir hata yapılmadığını, ölçülerin kendi içinde uyumlu olduğunu ve kullanılan yörünge bilgisinin yüksek doğruluğa (~ 15 cm) sahip olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmadan başka sonuçlar da çıkarmak olanaklıdır. Örneğin, Şekil 4.14 incelendiğinde (ve zenit parametresi hesaplanmış olan grafiklerle karşılaştırıldığında) yalnızca standart atmosfer kullanılarak (hiç bir zenit parametresi hesaplanmadan) elde edilecek sonuçların bir çok mühendislik uygulaması için yeterli doğruluğu sağladığı görülmektedir. Dolayısıyla, mühendislik amaçlı uygulamalarda ve özellikle baz uzunluklarının fazla uzun olmadığı (< 50 km) durumlarda GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde pahalı ve kullanılması özel eğitim isteyen yazılımlar yerine, çok daha ucuz olan ve kullanılması ayrıca bir eğitim gerektirmeyen ticari amaçlı yazılımların daha ekonomik olacağı da söylenebilir. Ayrıca, mevcut ticari yazılımların bazılarında da Yöntem-D'ye benzer bir seçeneğin eklenmesi ile ilgili çalışmaların devam ettiği bilinmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçların presizyonu ile ilgili yalnızca tekrarlanabilirlik hesaplamaları ile yetinilmiş, GPS bazlarının lup kapanmaları yapılmamıştır. Bunun en önemli nedeni ise çok sayıda tekrarlı veri olmasıdır. Ayrıca, bilindiği gibi, lup kapanmaları GPS projelerinin uygulandığı ilk yıllarda çok önemli idi [87]. Çünkü, o yıllarda kullanılan alıcı tipleri farklı, ölçü süreleri zorunlu olarak daha az, uydu ağı yetersiz, kullanılan yörünge bilgilerinin doğruluğu düşük, değerlendirme yazılımları henüz tam anlamıyla geliştirilmemişti. Tüm bu olumsuzlukların sonucu olarak, elde edilen bazların lup kapanmaları değerlendirme doğruluğu için önemli bir ölçüt olarak kabul ediliyordu. Oysa, günümüzde bu sorunlar hemen hemen tamamen ortadan kalkmıştır. Artık GPS projelerinde tek tip alıcı kullanılmaktadır ve bu alıcıların uydu izlemedeki data kaybı en aza indirilmiştir. Ölçü süreleri en az 6 saatten başlayarak 24 saate kadar ulaşmaktadır. Uydu ağı ise mükemmel hale gelmiş, IGS yörünge bilgilerinin hesaplanmasında 10-15 cm doğruluklara ulaşmıştır.

Tüm bunlar dikkate alındığında, tüm GPS bazlarının eş zamanlı dengelemesi sonucunda elde edilecek istatistik bilgiler eğer normal ise, tüm olası lup

kapanmaları şartlarının sađlanmıř olacađı dűřűnűlmektedir. Yine de, çok kısa sűreli ve yeterli sayıda tekrar edilmemiř ۆlűlerin deđerlendirilmesi gerektiđinde lup kapanmalarının da ۆnemli bir kontrol ۆlűtű olduđu dűřűnűlmektedir.

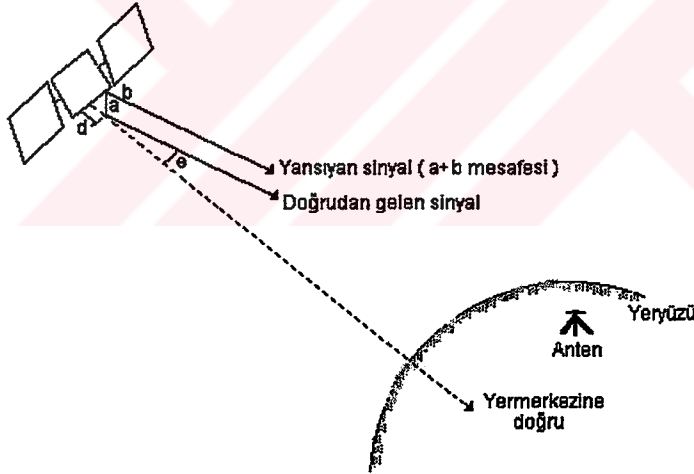
Bu alıřma ile elde edilen sonuçların presizyonu ile ilgili bilgi elde etmek için uygulanabilecek bir bařka yol ise Tablo-4.11'de verilen yۆntemlerden en uyumlu sonuç verdiđi dűřűnűlen bir yۆntem (ۆrneđin Yۆntem E) hatasız kabul edilip buradan elde edilen sonuçlarla diđer yۆntemlerden elde edilen sonuçlar arasında Helmert dۆnűřűmű yapmaktır. Bۆylece, yۆntemler arasındaki dۆnűřűm sonucu elde edilecek farklar da bize deđerlendirmelerin i duyarlılıđı hakkında bir bilgi verecektir.



BÖLÜM 5. SİNYAL YANSIMASI (MULTIPATH)

5.1. Genel

GPS alıcıları ile birlikte kullanılan antenlerin hemen tamamı tüm yönlerden gelen uydu sinyallerini eşzamanlı alabilme (omnidirectional) özelliğine sahiptir. Antenin kurulduğu arazi yapısına ve sinyal yükseklik açısına (cut-off angle; elevation angle) bağlı olarak kaydedilen uydu sinyallerinde arzu edilmeyen sinyal yansımalarının da karışması söz konusudur. Uydulardan yayınlanan sinyallerin yeryüzünde herhangi bir noktada kurulu olan antene, bir veya daha fazla sayıda yol izleyerek ve esas sinyale karışarak ulaşmasına sinyal yansıma (multipath) etkisi denir.



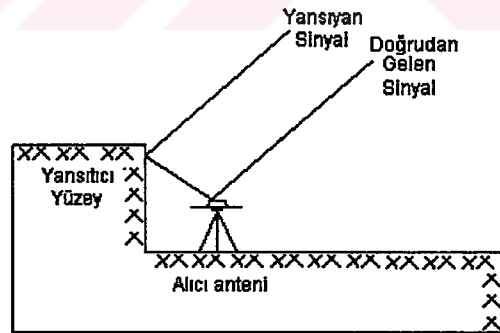
Şekil-5.1. Uydu Sinyal Yansıması (Satellite Multipath)

Sinyal yansıması uydu ve antenin her ikisi için de sözkonusudur. Başka bir deyişle sinyal yansımalarını, uyduların neden olduğu yansımalar (satellite multipath) ve alıcı antenin çevresindeki yüzeylerin neden olduğu yansımalar (antenna multipath) diye ikiye ayırmak olanaklıdır. Bunlardan uyduların neden olduğu etkiler, (şekil-5.1), özellikle yerel ağlardaki orta uzunluklu bazlarda (<100-200 km) bazın her iki ucundaki anten için de aynı büyüklüğe sahip olacağından göreceli konumlama yöntemi kullanıldığında büyük ölçüde elimine olacaktır [89]. Dolayısıyla, burada anten sinyal

yansımaları üzerinde durulacaktır (şekil-5.2). Anten çevresinin neden olduğu yansımaların olası kaynakları ise yapılar, araçlar, su yüzeyleri (deniz, göl) ve diğer yansıtıcı yüzeylerdir. Bu sinyal yansımaları faz ve/veya kod (pseudo-range) gözlemlerini, geçiş anındaki uydu-alıcı geometrisine bağlı olarak sistematik, zamana bağlı sinüzoidal sinyaller şeklinde bozarlar [90] .

Sinyal yansıma etkisinin büyüklüğü dalga boyu ile orantılı olup bu etkinin neden olduğu hata P-kod (Precise/Protected-Code) için taşıyıcı dalga fazına göre yaklaşık yüz kat daha fazladır [91].

Bu etkinin kod (pseudorange) ve faz gözlemlerindeki büyüklüğü için birçok araştırma yapılmış ([92-97]) ve TI-4100 alıcısı ile P-kod gözlemlerinde normal yansıtma ortamında 1.3 m ve yüksek yansıtma ortamlarında ise 4-5 m lik değişimler gözlenmiştir. Faz gözlemleri için yapılan denemelerde ise maksimum 4.8 cm lik bir değer hesaplanmıştır [92]. Tüm bu sonuçlar ise multipath etkisinin kod gözlemleri için daha büyük olduğunu göstermektedir. Çok kötü çevre koşullarında multipath, kod gözlemlerinde kesikliklere neden olabilmektedir. Bu ise özellikle faz başlangıcı bilinmeyenlerinin (Ambiguity) çözümünde kod/faz kombinasyonu kullanılması durumunda (örneğin fotogrametrik amaçlı GPS gözlemlerinde) daha da önem kazanmaktadır.



Şekil-5.2. Alıcı Anteni Sinyal Yansıması

Anten sinyal yansıması etkisi esas olarak antenin kurulu olduğu noktanın çevresindeki yansıtıcı yüzeylere bağlıdır. Eğer anten aynı nokta üzerinde hiç oynatılmadan birkaç gün sabit olarak tutulursa, söz konusu etki günlük yaklaşık 4 dakikalık bir değişimle (güneş zamanı ile yıldız zamanı arasındaki 3' 56".9 farktan dolayı) tekrar edecektir. Bunun nedeni ise uydu-yansıtıcı

yüzey-anten geometrisinin bu süre içerisinde tekrar etmesi (aynı olması) dir. Dolayısıyla, bu tekrarlanabilirlik özelliğinden yararla anten sinyal yansımasının ana etkisi hesaplanarak gözlemler düzeltilebilmektedir [90].

Anten sinyal yansıması, kod ve faz gözlemleri için farklı etkilere sahip olduğundan bunları iki ayrı başlık altında incelemek yararlı olacaktır.

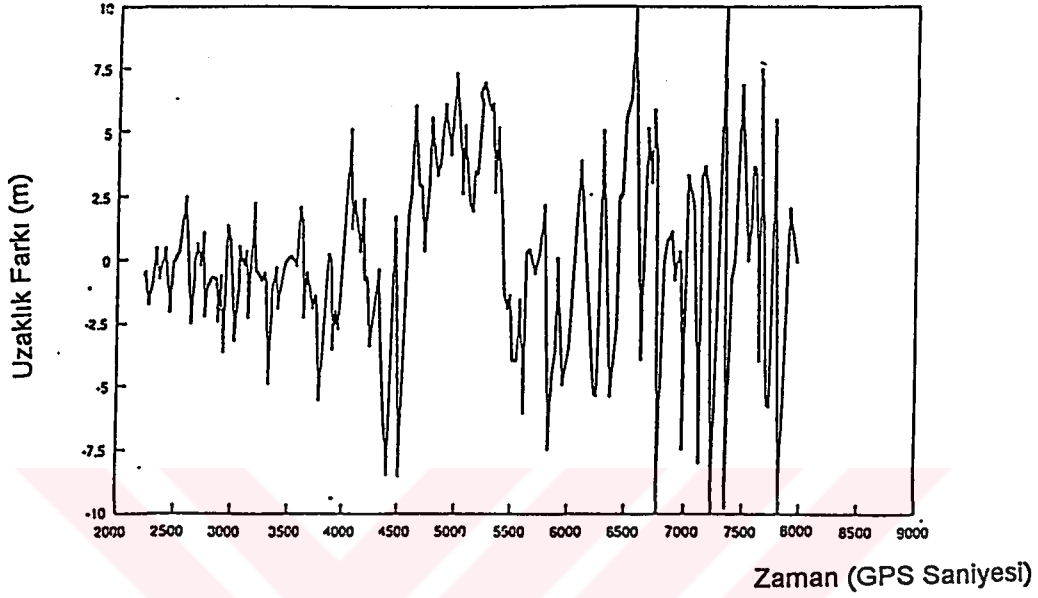
5.2. Kod Gözlemleri İçin Sinyal Yansıma Etkisi (Pseudorange Multipath)

Bilindiği gibi, kod gözlemleri uydudan yayınlanan sinyallerin, alıcıda üretilen aynı nitelikli sinyallerle karşılaştırılmaları sonucu elde edilmektedir. Diğer taraftan multipath etkisinin mevcut olduğu ortamlarda alıcı tarafından kaydedilen uydu sinyali, doğrudan gelen sinyal ile yansıyan sinyallerin bir karışımıdır. Bunun ise, alıcıda üretilen sinyal ile gerçek uydu sinyalinin karşılaştırılmasını sağlayan korelasyon fonksiyonuna bozucu etkisi söz konusudur. Bu da söz konusu sinyaller arasındaki maksimum korelasyonun sağlanması aşamasında bir hataya neden olacaktır. (Şekil 5.3)'de tipik bir yansıtıcı ortamda TI-4100 anteni kullanılarak P-kod ile pseudorange gözlemindeki multipath etkisini göstermektedir [80]. Bu şekilden görüldüğü gibi birkaç dakikalık sürelerde multipath etkisi ± 10 m arasında değişim göstermekte ve bazen de 50 cm civarında olmaktadır. Burada elde edilen değerler [84]'de verilen değerlerle aynı sonucu vermektedir. Ancak TI-4100 antenlerinin multipath etkisine çok duyarlı olduğu bilinmektedir [97]. Bu nedenle burada verilen değerlerin farklı yapıdaki antenler için (örneğin microstrip antenler) daha küçük olması umulmaktadır. Nitekim, farklı alıcı antenleri kullanılarak yapılmış test sonuçları [91, 97, 98]'de verilmektedir.

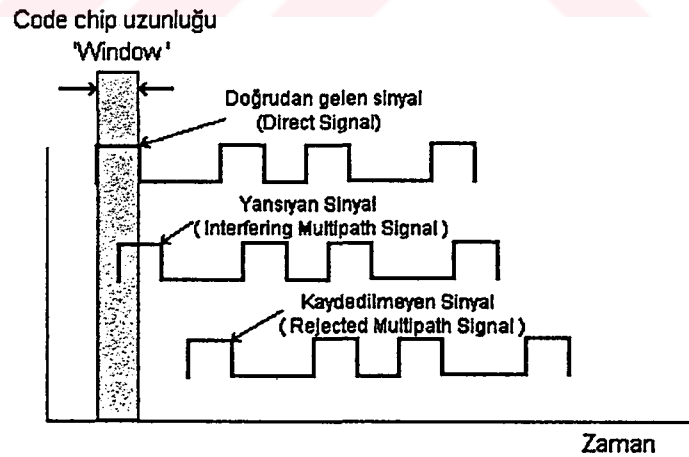
Alıcı anteni su yüzeyi üzerinde ya da yakınında ise, diğer bir ifadeyle eğer yansıtıcı yüzey bir su yüzeyi ise, multipath etkisi daha da önemli bir durum oluşturmaktadır [99].

Kod modülasyonlu sinyaller, geniş spektruma sahip olmaları nedeniyle, multipath etkisini gerçek sinyalden daha kolay ayırtedebilme özelliğine sahiptir. Kod modülasyonlu sinyaller (pseudoranges) chip uzunluğu ile tanımlanmakta olup alıcılar bu chip uzunluğuna göre senkronize edilmektedir

[100]. Chip uzunluğu, alıcının bu uzunluk dışında (code chip length window) ulaşan diğer sinyalleri algılamamasını sağlamaktadır (Şekil-5.4). Ancak bu uzunluk içerisinde ulaşan sinyalleri gerçek sinyalden (direct pseudorange) ayırtedememektedir [100].



Şekil-5.3. P-kod Pseudorange Multipath



Şekil-5.4. Chip Uzunluğu (Code Chip Length Window)

Aynı şekilde, eğer gözlemler sırasında sinyal yükseklik (veri toplama) açısı yeteri kadar büyük değilse, anten gerçek sinyaller ile yansıyan sinyaller

arasında ayırım yapamaz [8]. Bu nedenle gözlemler sırasında sinyal yükseklik açısı 10 dereceden büyük seçilmektedir.

Anten sinyal yansımasının kod ölçülerindeki etkisinin büyüklüğü, yapılan hesaplamalar sonucu P-kod için maksimum 29.3 m ve C/A-kod için 293.2 m değere ulaşmakta ise de P-kod için yapılan denemelerde bu değer 4-20 m arasında bulunmuştur [101].

Kod ölçüleri için anten sinyal yansıması ile ilgili kuramsal yaklaşımlar [102]'de verilmektedir.

5.3. Sinyal Yansımasının Taşıyıcı Dalga Faz Gözlemlerine Etkisi (Carrier Phase Multipath)

Bozucu sinyal yansımaları (multipath etkileri) faz gözlemlerinde, hesaplanan uydu-alıcı uzaklığında birkaç santimetrelilik periyodik sapmalara neden olan faz değişimine (phase shift) yol açmaktadır. Antene doğrudan ve yansiyarak gelen sinyaller sırasıyla,

$$A_D = A \cdot \cos \phi_D \quad (5.1)$$

$$A_R = \alpha A \cos(\phi_D + \Delta\phi) \quad (5.2)$$

ile verilmektedir [10,92]. Burada,

A_D = doğrudan gelen sinyalin kuvveti (genliği)

A_R = yansiyarak gelen sinyalin kuvveti

α = yüzey yansıtma katsayısı (damping factor; $0 \leq \alpha \leq 1$)

0 : yansıma yok

1 : yansıyan sinyal doğrudan gelen sinyal kadar kuvvetli

ϕ_D = doğrudan gelen sinyalin fazı

$\Delta\phi$ = yansiyarak gelen sinyalin doğrudan gelen sinyale göre olan faz kayıklığı

Alıcı anteni tarafından algılanan sinyal A_D ve A_R 'nin toplamı olacağından

$$A = A_D + A_R = \beta A \cos(\phi_D + \psi) \quad (5.3)$$

yazılabilir. Burada sinyal genliği β ,

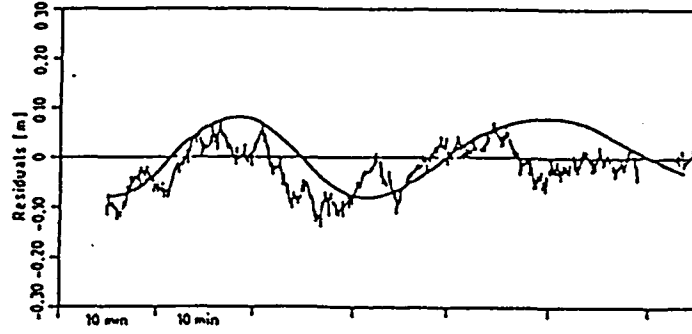
$$\beta = (1 + 2\alpha \cos \Delta\phi + \alpha^2)^{1/2} \quad (5.4)$$

ve anten sinyal yansıması nedeniyle taşıyıcı dalga fazındaki hata ψ ,

$$\psi = \arctan\left(\frac{\sin \Delta\phi}{\alpha^{-1} + \cos \Delta\phi}\right) \quad (5.5)$$

ile belirlidir [10]. Buradan da görüldüğü gibi anten sinyal yansımasının taşıyıcı dalga fazındaki hatasının genliği (kuvveti : amplitude), yalnızca yansıyan sinyalin doğrudan gelen sinyale göre bağıl sinyal kuvveti olarak ifade edilen α faktörüne bağlıdır. (5.5) eşitliğinden yararlanarak $\alpha = 1$ için faz gözlemleri için maksimum olası anten sinyal yansıması hatası $\psi = 90^\circ$ olarak bulunur. Bu hata miktarı ise L1 frekansı için ($\lambda_{L1} = 19.05$ cm) yaklaşık 4.8 cm'ye karşılık gelmektedir. L1 ve L2'nin lineer kombinasyonları için (L3, L4, L5 vd.) bu değer daha büyük ya da küçük olabilmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi, anten sinyal yansıması esas olarak uydu-anten-yansıtıcı yüzey geometrisine bağlı olduğundan ve bu geometri birkaç gün için yaklaşık sabit olacağından (bu geometri güneş zamanı ile yıldız zamanı arasındaki fark, her gün yaklaşık 4 dakika kadar erken tekrar edecektir) faz gözlemlerindeki anten sinyal yansıma etkisi de ardışık gözlem günlerinde benzer olacaktır. Ayrıca, değişen uydu geometrisi nedeniyle bu etki yaklaşık 20-30 dakikalık sürelerle yinelenmektedir. Şekil-5.5'de bununla ilgili bir örnek görülmektedir. Dolayısıyla bu etkinin ortalama bir değere ulaşması için GPS gözlemleri 30 dakikadan daha uzun süreli yapılmalıdır [10,90].



Şekil 5.5. İkili Faz Farkı (Double Difference) Gözlemlerinde Gözlenen ve Hesaplanan(Düz Çizgi) Multipath Etkisi (264 üncü ölçü günü - 9 ve 12 numaralı uydular için)

GPS gözlemlerindeki anten sinyal yansıma etkisini belirlemek için birçok yöntem mevcuttur [102]. Ancak bunlardan en kolayı doğal olarak ardışık günlere ait gözlemlerin dengeleme (post-process) sonrası düzeltme (residuals) değerlerinin karşılaştırılmasıdır. Eğer bu ardışık günlere ait düzeltme değerlerine ait çizimler aynı tip eğilimler gösteriyorsa buradan gözlemlerde atmosferik etkilerden çok anten sinyal yansıma etkisinin hakim olduğu sonucuna varılabilir. Bunu uygulayarak görmenin en kolay yolu ise çok kısa bir bazda (~50-100 m) çift frekanslı bir alıcı ile yapılmış gözlemlere ait düzeltme değerlerinin irdelenmesidir. Çünkü çift frekansta gözlem yapmanın temel nedeni iyonosferik etkinin giderilmesidir. Dolayısıyla çok kısa baz uzunluklarında iyonosferik etkinin tamamen giderildiği kabul edilirse (L3 frekansı kullanılarak değerlendirme yapılırsa) söz konusu düzeltmelerdeki büyük değişimler sinyal yansıma etkisi olarak yorumlanabilir.

Bu konu pek çok araştırmacı tarafından ayrıntılı bir şekilde farklı baz uzunluklarında ve farklı alıcı antenleri için irdelenmiştir [92,93,97,102].

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. İyonosferik Etki İle İlgili Sonuçlar

Tüm diğer ölçü sistemlerinde olduğu gibi, GPS ile konum belirlemede elde edilen büyüklüklerin doğruluğunu sınırlayan bir çok sistematik ve rastlantısal hatalar vardır. Göreli konumlama yöntemi kullanılması durumunda bile bu hataların bir kısmı (troposferik ve iyonosferik etki, sinyal yansıma etkisi, anten faz merkezindeki değişimler, sabit olarak alınan nokta koordinatlarındaki hatalar vb.) giderilememektedir. Dolayısıyla, bu sistematik ve rastlantısal hataların GPS ile gözlenen büyüklükler üzerindeki etkileri iyi bilinmelidir.

Dikkate alınmamış ya da uygun şekilde modellendirilmemiş iyonosferik etki, göreli GPS ölçülerinde en önemli doğruluk sınırlayıcı faktördür. Bu çalışmada, yapılan değerlendirmeler sonucu, iyonosferik etkinin çift frekanslı alıcılarla ölçü yapılması durumunda büyük ölçüde giderilebildiği görülmüştür. Ancak, çift frekanslı alıcılar tek frekanslı alıcılara göre oldukça pahalıdır ve özellikle araştırma amaçlı kurumlar için ekonomik olmamaktadır. Bu durumda özellikle küçük ağlarda (<20-30 km) bir alıcının çift frekanslı ve diğer alıcıların ise tek frekanslı olması en ekonomik çözüm olarak kabul edilebilir. Böylece, konu içinde de belirtildiği gibi proje alanındaki bu çift-frekanslı alıcıdan yararlanarak o bölge için uygun bir iyonosfer modeli oluşturulmakta ve bu model tek frekanslı alıcılar tarafından toplanan verilerin değerlendirilmesinde kullanılarak iyonosferin sistematik etkisi büyük ölçüde giderilebilmektedir. Ancak, proje alanı büyükse (>100 km) bu durumda çok sayıda çift frekanslı alıcıya gereksinim vardır. Diğer taraftan eğer proje alanında yalnızca tek-frekanslı alıcılar varsa bu durumda uygun bir iyonosfer modeli oluşturulamayacağından uydu mesajlarının bir bölümü olarak yayınlanan iyonosferik düzeltme katsayılarından yararlanılabilir. Ancak bu katsayılar kullanılarak iyonosferik etkinin yaklaşık % 50'si giderilebildiğinden yalnızca tek frekanslı alıcıların özellikle jeodezik ve jeodinamik amaçlı kullanımı için yeterli değildir. Bu nedenle Uluslararası Jeodinamik Amaçlı GPS Hizmeti (IGS) yörünge bilgisi [28] kapsamında, yayın efemerisi

içerisinde yayınlanan iyonosferik modelin doğruluğundan daha yüksek doğruluktaki model parametrelerinin yayınlanmasına karar verilmiştir. Bu konudaki çalışmalar halen devam etmektedir [29].

6.2. Troposferik Etki İle İlgili Sonuçlar

Sayısal uygulamalardan da görüldüğü gibi, ortam etkileri hem mutlak hem de görelî GPS konumlamada en önemli doğruluk sınırlayıcı faktörlerdendir. Bunlardan troposferik etki daha çok hesaplanan yükseklik farklarının doğruluğunu etkilemektedir. Bu etki örneğın, yaklaşık olarak 50 km'den uzun bazlardaki yükseklik farklarında yaklaşık 3 cm büyüklüğünde sapmaya neden olmaktadır [31]. Troposferik etkiler frekans bağımlı olmadıklarından (her iki frekansta da yaklaşık aynı büyüklüğe sahiptir), iyonosferik etkilerde olduğu gibi çift frekansta yapılmış ölçüler kullanılarak giderilememektedir. Dolayısıyla, uygulamada bu etki uygun modellendirmeler yardımıyla en aza indirilmektedir. Troposferik gecikmenin en önemli kısmı atmosferin kuru bileşeninden dolayıdır. Ancak, kuru bileşen mutlak konumlamada bir kaç cm doğrulukla, görelî konumlamada ise yaklaşık 0.1 ppm doğrulukla modellendirilebilmektedir [86].

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar irdelendiğinde, yükseklik farkı belirlemenin önemli olduğu çalışmalarda troposferik etkinin mutlaka dikkate alınması gerektiği ilgili grafiklerden açıkça görülmektedir. Örneğın , Şekil-4.37 incelendiğinde (YöntemA -Yöntem E), hesaplanan nokta yüksekliklerine troposferik etkiden dolayı gelen düzeltme miktarının her 100 m lik yükseklik farkı için yaklaşık 8 cm civarında olduğu görülmektedir. Başka bir deyişle, noktalar arasında 30 m lik bir yükseklik farkı olması durumunda (ITAY-AYVA bazı) troposferik etki nedeniyle gelen düzeltme miktarı 6 cm iken, 1520 m lik yükseklik farkı olması durumunda (ITAY-ULUD bazı) bu miktar 114 cm civarındadır. Dolayısıyla, noktalar arasındaki yükseklik farkına bağılı olarak troposferik etki mutlaka dikkate alınmalıdır. Bu durum özellikle noktalar arası yükseklik farklarının fazla olduğu kısa kenarlı ağlarda daha da büyük önem kazanmaktadır.

Ayrıca, eğer meteorolojik aletler yüksek prezisyonlu ve ölçü öncesi kalibrasyonları yapılmışsa bu aletlerle yapılan ölçüler kullanılarak yapılan değerlendirmelerin, standart model kullanılıp zenit parametresi hesaplanarak

yapılan değerlendirmelerle yaklaşık aynı sonuçları verdiği görölmüştür. Dolayısıyla, buradan, troposferik etkilerden arındırılmış yükseklik farklarının elde edilebilmesi için pahalı ve yüksek prezisyonlu meteorolojik aletlerin kullanılmasının, standart atmosfer ve zenit parametresi hesaplanarak yapılan çözümlere göre bir üstünlük sağlamadığı da açıkça görölmüştür. Grafikler incelendiğinde standart atmosfer modeli ve zenit parametresi hesaplanarak elde edilen sonuçların çok az farklı da olsa gerçek meteorolojik değerler kullanılarak elde edilen sonuçlara göre daha iyi tekrarlanabilirlik gösterdiği de görölmektedir.

Diğer taraftan, bu çalışma orta uzunluktaki bazlar kullanılarak yapılmıştır. Oysa, kısa kenarlı (~ 5-15 km) bazlar kullanıldığında Bölüm (4.3.1)'de belirtilen nedenlerden dolayı gerçek meteorolojik parametreler kullanılarak elde edilecek sonuçların daha da kötü olabileceği düşünölmektedir.

Bu çalışmanın en önemli özelliklerinden birisi de bugüne kadar yapılan değerlendirmelerde (Kuzey Anadolu Fay Hattı 1990, 1991,1992,1993 ve 1995; Marmara 1990, 1992 ve 1994, Ankara GPS Test Ağı kampanyaları vd.) stokastik modellendirmenin (Yöntem-E) bir anlamda ilk defa burada denenmiş olmasıdır. Kullanılan bilgisayar kapasitesi açısından bu deneme, gerçek stokastik anlamda her epok için yapılamamıştır, ancak her 30 dakika için zenit parametresi hesaplanabilmiştir. Bu deneme ile elde edilen sonuçlar Yöntem-C ve Yöntem-D ile elde edilenlere göre fazla farklı sonuçlar vermemiştir. Ancak, Yöntem-E kullanılarak elde edilen tekrarlanabilirlik değerleri ile daha uyumlu (smooth) grafikler elde edilmektedir. Dolayısıyla, örneğin Yöntem-D ile hesaplanan sonuçlar stokastik modellendirme ile elde edilen sonuçların bir ortalaması olarak düşünölebilir. Oysa, farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda, gerçek anlamda stokastik modellendirme teknikleri kullanılarak elde edilen sonuçların çok daha iyi olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak elde mevcut bilgisayar kapasitesi yeterli, uzun süreli ölçüler söz konusu ve yüksek doğruluklu sonuçlar isteniyorsa Yöntem-E' nin kullanılmasının daha iyi olacağı, özellikle uygun bilgisayar olanağının bulunmaması durumunda ise Yöntem-C veya D' nin kullanılmasının daha ekonomik olacağı değerlendirilmektedir.

Bu çalışmada kullanılan GPS ölçüleri yerel saat ile 16:30 - 23:30 arasında gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla, yaklaşık 7 saatlik bir veri olmasına karşın,

söz konusu saatler arasında atmosferik etkilerin öğle saatlerine göre daha az olması nedeniyle özellikle Yöntem-D ve Yöntem-E ile çok iyi sonuçların alındığı düşünülebilir. Bölüm-4.7'de verilen ilgili tablo ve grafikler incelendiğinde elde edilen yükseklik doğruluğunun yaklaşık 1-2 cm arasında değiştiği görülmektedir. Bu ise bir çok jeodezik amaçlı çalışma için yeterlidir. Ancak, yükseklik bilgisinin çok önemli olduğu projelerde (örneğin, deniz düzeyinin belirlenmesi, üç boyutta yer kabuğu hareketlerinin incelenmesi, vb.) troposferik etkinin 1 cm'nin altında tutulabilmesi için farklı atmosferik koşulları kapsayacak şekilde uzun süreli GPS gözlemleri yapmakta yarar bulunmaktadır. Bu sürelerin her ölçü grubu (session) için 16-24 saat arasında ve bir kaç gün tekrarlı olarak yapılmasının bu şartı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu projelerde yükseklik bilgilerinin tüm uydu geometrisinden yararlanarak belirlenmesi gerçekte en iyi yol olarak düşünülebilir. Başka bir deyişle, alıcının gökyüzünde izleyebildiği bütün uydulara gözlem yapması belki de en ideal durumdur. Ancak, 15 derecenin altındaki ölçülerde sinyal yansıma etkisi azami olacağından, bu derecenin altındaki açılarda kaydedilen uyduların troposferik etkinin hesaplanmasına getireceği olumlu katkı, sinyal yansımasının olumsuz etkisinden çok daha küçük olacaktır. Bu nedenle, GPS kampanyalarında (ölçü noktası çevresinde yüksek engeller olması durumu dışında) 15 derece ve daha yukarısındaki uydulara gözlem yapılmaktadır. Türkiye gibi uydu izleme sorunu olmayan orta enlem kuşağındaki ülkeler için, değerlendirmelerde veri toplama açısının (uydu yükseklik açısı) 20 derece alınması sinyal yansıma etkisini hemen hemen tamamen giderecektir.

Sonuç olarak, bu çalışma ile elde edilen bilgiler yalnızca bir başlangıç olup bu konu ile ilgili daha farklı ve ayrıntılı çalışmaların da yapılması gerekmektedir. Örneğin burada denenmiş olan yöntemler ;

- farklı mevsimlerde,
- farklı arazi yapılarında,
- kısa kenarlı ağlarda (< 20 km),

denenerek, elde edilen sonuçlar özellikle

- Kalman filtreleme tekniği ile elde edilecek değerler,
- Meteorolojik balonlar veya

- Su buharı radyometresi

kullanılarak alınacak sonuçlar ile de karşılaştırılmalıdır.

Yukarıda belirtilen denemeler de yapıldığında, Türkiye koşullarında yapılan GPS gözlemleri için gerçeğe en yakın sonuçların elde edilebileceği düşünülmektedir.

6.3. Sinyal Yansıma Etkisi İle İlgili Sonuçlar

Uydulardan yayınlanan sinyallerin, gözlem noktası çevresindeki yansıtıcı yüzeyler nedeniyle birden fazla yol izleyerek antene ulaşması sonucu anten sinyal yansıma etkisi oluşmaktadır. Bu etki, faz ve kod gözlemlerinin her ikisi için de sözkonusu olup bunları farklı şekilde etkiler.

Günümüzde GPS gözlemlerini değerlendirme yazılımlarındaki önemli gelişmeler sonucu milimetre duyarlıklı baz uzunlukları elde etmek olanaklı olmuştur. Baz uzunluklarına bağlı hataların (örneğin iyonosfer, yörünge hataları vb.) yeni ve iyileştirilmiş yazılım modelleri ile giderilmesiyle, nokta konumuna bağımlı hatalar (örneğin sinyal yansıma etkisi) doğruluk sınırlayıcı önemli bir faktör haline gelmiştir. Bu nedenle, eğer GPS gözlemlerinden yüksek doğruluklu sonuçlar elde edilmek isteniyorsa sinyal yansıma etkisi ile ilgili aşağıdaki konulara dikkat edilmesinde yarar vardır ;

1. Sinyal yansıma etkisine karşı alınabilecek en etkin önlem anten kurulacak yerin seçimine özen göstermektir. Bu gibi yerler olabildiğince yansıtıcı yüzeylerden (metal, araba, su vb.) olabildiğince uzak olarak seçilmelidir.

2. Gözlemlerde sinyal yansıma etkisine duyarlı olmayan uygun dizaynli antenler (microstrip, choke ring, cavity baked, ground plane) kullanılmalıdır.

3. Anten çevresindeki yansımayı engelleyici (yutucu) malzemeler kullanılabilir.

4. Uyduların neden olduğu sinyal yansıma etkisi ihmal edilebilecek kadar küçüktür.

5. Sinyal yansıma etkisi tekrar eden uydu-anten-yansıtıcı yüzey geometrisi nedeniyle raslantısal olmayan sistematik bir hata kaynağıdır ve fark gözlemleri oluşturularak giderilemezler.

6. Düşük yükseklikli uydulardan gelecek sinyaller sinyal yansıma etkisine daha çok maruz kalırlar, bu nedenle GPS ile gözlemlerde yükseklik açısı (cut-off angle) 10° - 20° arası seçilmektedir. Veri toplama açısının yüksek seçilmesi aynı zamanda üçüncü ve daha üst dereceden iyonosferik etkileri de giderecektir. Diğer taraftan, düşük yükseklikli uydulara ait gözlemlerin kullanılmasının yükseklik belirlemeye önemli katkıları olduğu da bilinen bir gerçektir.

7. Günümüzde GPS'in sinyal yansıma etkisinin yoğun olduğu şehir alanlarında da özellikle 1-2 km gibi kısa bazların belirlenmesinde kullanıldığı göz önüne alınırsa buradaki doğruluğu sınırlayıcı en önemli etki sinyal yansıma etkisi olacaktır. Dolayısıyla anten için yansıtıcı yüzeylerden tamamen arındırılmış bir yer bulmak olanaklı değilse, bu durumda görelî konumlama yönteminde sinyal yansıma etkisini en aza indirmek için gözlemler en az 30 dakika yapılmalıdır. Çünkü, kısa gözlem süreleri söz konusu olduğunda, bu hata olduğu gibi konum bilgilerine girecektir. Bu durum özellikle kinematik GPS uygulamaları için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Oysa statik gözlemlerde yeteri kadar uzun gözlem periyodu uygulandığında sinyal yansıma etkisi ortalama bir değere geleceğinden, bu durum bir sorun oluşturmayacaktır. Ancak bu da zaman alıcı ve pahalı bir yöntem olup pratik uygulamalar için uygun değildir.

8. GPS gözlemlerindeki amaç eğer çok yüksek duyarlıklı yükseklik belirlemek ise bu durumda mutlaka uzun süreli gözlem yapılmalıdır. Dolayısıyla, GPS ile duyarlı yükseklik belirlemede hızlı statik (fast/rapid static) yöntemin uygun olmadığı sonucuna varılabilir. Araştırmalara göre sinyal yansıma etkisi nedeniyle yükseklikteki hata ± 15 cm yi bulmaktadır [92,98,103,].

9. Kısa baz uzunluklarında görelî konumlama ile faz gözlemlerinde sinyal yansıma etkisinden dolayı gelecek hata uygun uydu geometrisi ve yeterli ölçü süresi durumunda 1 cm'nin altında olmaktadır [43,104]. Ancak bu durumda bile aynı gün veya ardışık günlerde anten yüksekliğinde basit bir

değişikliğinin (~60 cm) sinyal yansıma etkisini önemli ölçüde artırdığı belirlenmiştir. Örneğin, [97]'de açıklanan bir araştırmada 30 m'lik bir bazda anten yüksekliği ilk güne göre ~60 cm kadar düşürüldüğünde sonuç çözümle elde edilen baz uzunluğunda 1 cm fark belirlenmiştir.

10. Sinyal yansıma etkisinin DGPS (Differential GPS) üzerindeki etkisi ise [105]'de araştırılmıştır. Burada, sinyal yansıma etkisi anten kurulu nokta yerine bağlı olduğundan referans nokta ile uzak (gezen) alıcı arasında hiçbir ilişki olmadığı sonucuna varılmıştır. Diğer bir ifadeyle, referans noktasında hesaplanacak olan sinyal yansıma etkisi düzeltmeleri uzak alıcı için geçerli değildir.

11. Sinyal yansıma etkisi frekans bağımlı olmayıp L1 ve L2 frekanslarında yapılan taşıyıcı dalga faz gözlemlerinin her ikisi için de aynı sinyal kuvvetine (genlik : amplitude) sahiptir [102].



KAYNAKLAR

- [1] FELL, P.J., Geodetic Positioning Using A Global Positioning System of Satellites. OSU, (1980).
- [2] REMONDI, B.W., Using the Global Positioning System (GPS) Phase Observable for Relative Geodesy Modelling, Processing and Results. Ph.D. Thesis. The University of Texas at AUSTIN. May, (1984).
- [3] Meydan Larousse, Meydan yayınevi, Cilt 1, syf. 840-841, (1981).
- [4] SİPHAİOĞLU, Ş., SARSILMAZ,Ş., Aeroloji, Meteoroloji Genel Md.lüğü Ankara, (1982).
- [5] DELİKARAOĞLU, D., On the Stochastic Modelling of GPS Ionospheric Delay. Manuscripta Geodaetica, Vol. 14,pp. 100-109, (1989).
- [6] Büyük Larousse. Milliyet Yayınları, Cilt 2, s. 994, (1986).
- [7] DODSON, A.H., Refraction and Propagation Delays in Space Geodesy INT.J.Remote Sensing, Vol.7, Nr.4, pp.515-524, (1986).
- [8] HESPER, E.T., Investigations on the Use of GPS for Geodetic and Orbit Determination Applications. Report LR-649, Delft University, February, (1991).
- [9] GEORGIADOU, Y., KLEUSBERG, A., On the Effect of Ionospheric Delay on Geodetic Relative GPS Positioning, Manuscripta Geodaetica, 13, pp.1-8, (1988).
- [10] SEEBER, G., Satellite Geodesy, Walter de Gruyter, (1993).

- [11] BURNSIDE, C.D., Electromagnetic Distance Measurements: Third Edition, Oxford, BSP Professional Books, (1991).
- [12] KINIK, İ., ŞANLI, İ., Başlangıçtan Günümüze Türkiye'de Yapılan Uydu Jeodezisi Faaliyetleri, HGK, Uzay Tek. Ş. İç Raporu, Ankara, (1991).
- [13] KLOBUCHAR, J.A., Ionospheric Time Delay Algorithm for Single Frequency GPS Users. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 23, Nr.3, May, (1987).
- [14] SANTERRE, R., Impact of GPS Satellite Sky Distribution. Manuscripta Geodaetica, vol.16, pp.23-53, (1991).
- [15] SPILKER, J.J., GPS Signal Structure and Performance Characteristics. The Institute of Navigation, Volume 1, Washington D.C., pp.29-54, (1978).
- [16] WELLS, D. Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates, (1986).
- [17] LEICK, A., GPS Satellite Surveying, Department of Surveying Engineering. University of Maine Orono, pp.52, (1990).
- [18] KAHVECİ, M. Ortometrik Yüksekliklerin Belirlenmesinde Global Konumlama (GPS) Sistemi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, (1993).
- [19] KINIK, İ., KAHVECİ, M., GÖNÜLALAN, A.U., AKÇA, M., GPS ile Pratik Konumlama Uygulamaları, TUJJB Genel Kurulu, Ankara, 8-11 Haziran, (1993).
- [20] BEUTLER, G., BAUERSIMA, İ., GURTNER, W., ROTHACHER, M., SCHILDKNECHT, T., GEIGER, A., Atmospheric Refraction and Other Important Biases in GPS Carrier Phase Observations. Monograph 12, School of Surveying, University of New South Wales, Australia. (1988).

- [21] ÖZAYDIN, D., KINIK,İ., ŞİMŞEK,M., DEMİR,C., LENK,O., Ankara GPS Test Ağı(AGTA)'nın Tanıtımı . HKMO, Harita Kurultayı, Ankara, Şubat, (1993).
- [22] WILD, U., Estimating the Ionosphere Using One or More Dual Frequency GPS Receivers. Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, March, (1989).
- [23] BEUTLER, G., Test of GPS on the CERN-LEP Control Network Presented at the Joint Meeting of FIG-Study Groups 5B and 5C, Munich, (1985).
- [24] BOUCHER, C., ALTAMIMI,Z., ITRF89 and Other Realizations of the IERS Terrestrial Reference System for 1989, April, (1991).
- [25] KINIK,İ., ŞAHİN,K., ŞANLI,İ., Ankara Test Ağı'nda GPS Ölçülerinin Değerlendirilmesi, Harita Dergisi, sayı 110, 6-37, Ocak, (1994).
- [26] BEUTLER, G., GURTNER,W., HUGENTOBLE,U., ROTHACHE,M., SCHILDKNECHT,T., Ionosphere and GPS Processing Techniques, Mitteilungen Der Satelliten-Beobachtungs. Zimmerwald, Nr.24, Durckerei Der Universitat, Bern, (1990).
- [27] ÖZDOĞAN,İ., IŞIKARA,A.M., ORBAY,N.,DÜZGİT,Z., Arzmagnetizması, İlkeler ve Uygulamalar. İstanbul Üniversitesi Yayınları, Sayı:3386, (1986).
- [28] IGS, International GPS Geodynamics Service, Newsletter 2, IGS, 92-3, (1992).
- [29] LEOS, M., BEUTLER,G., ROTHACHER,m., WILD, U., Ambiguity Resolution Strategies Using the Results of the International GPS Geodynamics Service (IGS). Bulletin Geodesique, pp.29-38, (1994).
- [30] NATO, Military Agency for Standardisation A Data Interchange Format for Navstar Global Positioning System (GPS), Preliminary Draft, NATO Unclassified, (1993).

- [31] BRUNNER, F.K., WELSCH, W.M., Effect of the Troposphere on GPS Measurements. GPS World, pp. 42-51, January, (1993).
- [32] ELGERED, G., JOHANSSON, J., RÖNNANG, B., Methods to Correct for the Tropospheric Delay in Satellite-Earth Range Measurements. In: Proceedings of the Second SATRAPE Meeting, Saint-Mande, France, November 4, (1985).
- [33] NEWBY, S.P., LANGLEY, R.B., JONES, H.W., The Spatial Correlation of Meteorological Measurements In Tropospheric Delay Modelling.
- [34] DODSON, A.H., SHARDLOW, P.J., HUBBARD, L.C.M., ELGERED, G., JARLEMARK, P.O.J., Wet Tropospheric Effects on Precise Relative GPS Height Determination. Journal of Geodesy, vol.70, pp.188-202, (1996).
- [35] SMITH, E.K., WEINTRAUB, S., The Constants in the Equation for Atmospheric Refractive Index at Radio Frequencies, Proc. IRE, 41, pp.1035-1057, (1953).
- [36] THAYER, D., An Improved Equation for the Radio Refractive Index of Air. Radio Science, 9, pp. 803-807, (1974).
- [37] RESCH, G.M., Water Vapor Radiometry in Geodetic Applications, in Geodetic Refractions, edited by F.K. Brunner, pp. 53-84, Springer-Verlag, New York, (1984).
- [38] HOPFIELD, H.S., Tropospheric Effect on Electromagnetically Measured Range : Prediction from Surface Weather Data. Radio Science, Volume 6, Number 3, pp. 357-367, March, (1971).

- [39] TRALLI, D.M., DIXON, T.H., STEPHENS, S.A., Effect of Wet Tropospheric Path Delays on Estimation of Geodetic Baselines in the Gulf of California Using the Global Positioning System. Journal Geophysical Research, Vol. 93, No. B6, pp. 6545- 6557, June 10, (1988).
- [40] DAVIS, J.L., HERRING, T.A., SHAPIRO, I.I., ROGE, A.E., ELGERED, G., Geodesy by Radio Interferometry : Effects of Atmospheric Modelling Errors on Estimates of Baseline Length, Radio Science, 20, 1593-1607, (1985).
- [41] BENIS, M., BUSINGER, S., HERRING, T.A., ROCKEN, C., ANTHES, R.A., WARE, R.H., GPS Meteorology : Remote Sensing of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System. Paper Submitted to JGR-Atmosphere, 20 March, (1992).
- [42] JANES, H.W., LANGLEY, R.B., NEWBY, S.P., A Comparison of Several Models For the Prediction of Tropospheric Propagation Delay. Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning. Las Cruces, New Mexico. pp.777-788, March 13-17(1989).
- [43] WELLENHOF, B.M., LICHTENEGGER, H., COLLINS, J., Global Positioning System Theory and Practice Springer-Verlag. New York, (1992).
- [44] TREUHAFT, R.N. , LANYI, G.E., The Effect of the Dynamic Wet Troposphere on VLBI Measurements TDA Progress Report, pp. 42-84, October- December (1985). Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, (1985).
- [45] ELGERED, G. International Association of Geodesy (IAG) Special Study Group 1.128 " The Wet Propagation Delay". Final Report, July, (1995).
- [46] KAHVECİ, M., GPS Ölçülerinin Değerlendirilmesinde İyonosferik Gecikme Etkisi. Harita Dergisi, sayı 113, syf.13-33, Temmuz, (1994).

- [47] SAASTAMOINEN, J., "Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging of Satellites." In: The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysical Monograph Series, Vol. 15, American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 247-251, (1972).

- [48] CHAO, C.C., A New Method to Predict Wet Zenith Range Corrections From Surface Measurements. Technical Report California Institute of Technology, JPL, 32-1256, XIV, pp. 33-41, (1973).

- [49] LANYI, G.E., Tropospheric Effects in Radio Interferometry, TDA Progress Report 42-78, pp. 152-159, JPL, Pasadena, California, (1984).

- [50] DAVIS, J.L., Atmospheric Propagation Effects on Radio Interferometry AFGL-TR-86-0243, Scientific Report No.1, April (1986).

- [51] MARINI, J.W., Correction of Satellite Tracking Data for an Arbitrary Tropospheric Profile. Radio Science, Vol 7, No. 2, pp. 223-231, February (1972).

- [52] BLACK, H.D., An Easily Implemented Algorithm for the Tropospheric Range Corrections. J. Geophys. Res. Vol. 83, No. 83, pp. 1825-1828, (1978).

- [53] GOAD, C.C. , Wallops Island Tropospheric Refraction Study and Analysis. Report Contract No. NAS 6-2173, Planetary Sciences Department No. 004-74, Wolf R&D Corp., Riverdale, Md. (1974).

- [54] De JONG, C.D. , GPS Satellite Orbits and Atmospheric Effects. Delft University of Technology, Reports of the Faculty of Geodetic Engineering, Mathematical and Physical Geodesy, No. 91-1, Delft, (1991).

- [55] SANTERRE, R., FORGUES, I., MENDES, V.B., Comparison of Tropospheric Mapping Functions: I. FORGUES, Their Effects on Station Coordinates. IUGG, XXI General Assembly, Boulder, Colorado, (1995).

- [56] YIONOULIS, S.M., Algorithm to Compute Refraction Effects on Range Measurements. *Journal of Geophys. Res.*, 75 (36), pp. 7636-7637 (1970).
- [57] GOAD, C.C., GOODMAN, L., A Modified Hopfield Tropospheric Refraction Correction Model. Presented Paper, AGU Annual Fall Meeting, San Francisco, Calif. 12-17 December, (1974).
- [58] BLACK, H.D., EISNER, A., Correcting Satellite Doppler Data for Tropospheric Effects. *Journal of Geophys. Res.*, 89 (D2), pp. 2616-2626. (1984).
- [59] SAASTAMOINEN, J., Contribution to the Theory of Atmospheric Refraction. *Bull. Geodesique*, V. 105-107, pp. 279-298, 283-297, 13-34, (1973).
- [60] CHAO, C.C., A Model for Tropospheric Calibration from Daily Surface and Radiosonde Balloon Measurements. JPL Technical Memorandum, 391- 350, JPL, Pasadena, California, (1972).
- [61] BERMAN, A.L., The Prediction of Zenith Range Refraction from Surface Measurements of Meteorological Parameters. JPL Technical Report 32-1602, JPL, Pasadena, California, (1976).
- [62] NIELL, A.E., Global Mapping Functions for the Atmospheric Delay at Radio Wavelengths. *J. Geophys. Res.* (1995).
- [63] HERRING, T.A., Modelling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data. *Proc. of the Symp. Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*. Eds. J.C. DeMunck and T.A.Th. Spoelstra, Netherlands Geodetic Commission, Publ. on Geodesy, No. 36, pp. 157-164, (1992).
- [64] MENDES, V., LANGLEY, R.B., A Comprehensive Analysis of Mapping Functions Used in Modelling Tropospheric Propagation Delay in Space Geodetic Data. *International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation*, Canada, (1994).

- [65] HOPFIELD, H.S., Tropospheric Correction of Electromagnetic Ranging Signals to a Satellite : A Study of Parameters. Paper presented at Symposium on Electromagnetic Distance Measurements and the Influence of Atmospheric Refraction, 23-28 May, (1977).
- [66] BEUTLER, G., GURTNER, W., The Influence of Atmospheric Refraction on the Evaluation of GPS Phase Observations. Satellitenbeobachtungsstation Zimmerwald Bericht Nr. 16, (1987).
- [67] BRUNNER, F.K., McCLUSKEY, S., Tropospheric Zenith Delay Parameters. How Many Should be Estimated In GPS Processing ? Aust. J. Geod. Photogram. Surv. No. 55, pp. 67-75, December, (1991).
- [68] BEUTLER, G., GURTNER, W., ROTHACHER, M., WILD, U., FREI, E., Relative Static Positioning With the Global Positioning System : Basic Technical Considerations. (1990).
- [69] JANSSEN, M.A.A., A New Instrument for the Determination of Radio Path Delay Due to Atmospheric Water Vapor. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., GE-23, pp. 484-490, (1985).
- [70] GURTNER, W., BEUTLER, G., BOTTON, S., ROTHACHER, M., GEIGER, A., KAHLE, H.G., SCHENIDER, D., WIGET, A., The Use of the Global Positioning System in Mountainous Areas Manuscripta Geodaetica, pp. 53-60, vol. 14, (1989).
- [71] RESCH, G.M., CHAVEY, M.C., YAMANE, N.I., BARBIER, K.M., CHANDLE, R.C., Water Vapor Radiometry Research and Development Phase Final Report, JPL Publication 85-19, California , (1985).
- [72] ELGERED, G., Water Vapor Radiometry with Applications to Radio Interferometry and Meteorology, Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden , (1983).

- [73] ROTHACHER, M., Orbits of Satellite Systems in Space Geodesy
Geodatisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Band 46,
(1992).
- [74] ROTHACHER, M., BEUTLER, G., GURTNER, W., BROCKMANN, E.,
L. MERVART, Bernese GPS Software Version 3.4. May (1993).
- [75] DIXON, T.H. , WOLF, S.K., Some Tests of Wet Tropospheric
Calibration for the CASA UNO Global Positioning System
Experiment. Geophysical Research Letters, Vol. 17, No. 3,
pp. 203-206, (1990).
- [76] GELB, A., Applied Optimal Estimation. The Analytic Sciences
Corporation. M.I.T. Press, Cambridge, (1988).
- [77] KALMAN, R.E., A New Approach to Linear Filtering and Prediction
Problems. J. Basic Eng. pp. 35-46, March (1960).
- [78] LICHTEN, S.M., BORDER, J.S., Strategies for High-Precision Global
Positioning System Orbit Determination. Journ. Geophys.
Res., 92, pp. 12751-12762, (1987).
- [79] DIXON, T.H., GONZALES, G., LICHTEN, S.M., KATSIGRIS, E.,
First Epoch Geodetic Measurements with the Global
Positioning System Accross the Northern Caribbean
Plate Boundary Zone. Journ. Geophys. Res. vol.96 (32),
pp. 2397-2415, (1991).
- [80] WELLS, D.E., Doppler Satellite Control. Department of Surveying
Engineering, University of New Brunswick, Fredericton,
N.B., (1974).
- [81] ROTHACHER, M., BEUTLER, G., GURTNER, W., GEIGER, A.,
KAHLE, H.G., SCHNEIDER, D., The Swiss 1985 GPS Campaign.
Proceedings of the Fourth International Geodetic
Symposium on Satellite Positioning. Austin, Texas,
April 28- 2 May, Vol.2, pp. 979-991, (1986).

- [82] BEUTLER, G., BAUERSIMA, I., BOTTON, S., ROTHACHER, M., SCHILDKNECHT, T., Accuracy and Biases in the Geodetic Application of the Global Positioning System. *Manuscripta Geodaetica*, 14, 28-35, (1989).
- [83] STRAUB, C., KAHLE, H.G., Active Crustal Deformation in the Marmara Sea Region, NW Anatolia, Inferred from GPS Measurements. Reprint from *Geophysical Research Letters*, (1995).
- [84] BOUCHER, C., ALTAMIMI, Z., ITRF92 and its Associated Velocity Field, IERS Technical Note 15, Paris, (1993).
- [85] BLEWITT, G. Carrier Phase Ambiguity Resolution for the Global Positioning System Applied to Geodetic Baselines up to 2000 km. (1989).
- [86] GENDT, G., BEUTLER, G., Consistency in the Troposphere Estimation Using the IGS Network. IGS Special Topics and New Directions Workshop Proceedings. Potsdam, May 15-18, (1995).
- [87] FGCC, Geometric Geodetic Accuracy Standards and Specifications for GPS Using Relative Positioning Techniques, version 5, August, (1989).
- [88] AYHAN, M.E., KINIK, I., DEMİR, C., KAHVECİ, M., Global Konumlama Sistemi (GPS) ile Kuzey Anadolu Fay (KAF) Kuşağında Yerkabuğu Hareketlerinin Belirlenmesi. Türkiye 13. Kurultayı, Ankara, 5-9 Nisan, (1993).
- [89] YOUNG, L.E., NEILAN, R.E., BLETZACKER, F.R., GPS Satellite Multipath: An Experimental Investigation Proc. Symp. Pos. GPS, Rockville, MD, April 15-19, pp.423-432. (1989).
- [90] DIXON, T.H., An Introduction to the Global Positioning System And Some Geological Applications Reviews of Geophysics, 29, pp.249-276, (1991).

- [91] MELBOURNE, W.G., GPS-Based Geodesy Tracking: Technology Prospects for the Year 2000. Geodesy in the year 2000. National Academy Press, Washington D.C., pp. 124-176 (1990).
- [92] GEORGIADOU, Y., KLEUSBERG, A., On Carrier Signal Multipath Effects in Relative GPS Positioning. Manuscripta Geodaetica 13:172-179, (1988).
- [93] GEORGIADOU, Y., KLEUSBERG, A., Multipath Effects in Static Kinematic GPS Surveying, Paper presented at the August 3-12, IAG General Meeting, Edinburgh, UK, (1989).
- [94] EVANS, G.A., CARR, Y.T., Effect of Signal Multipath Error at DMA Global Positioning System Satellite Tracking Sites on Orbit Accuracy Manuscripta Geodaetica 14 :pp.143-148, (1989).
- [95] EVANS, A.G., Comparison of GPS Pseudorange and Biased Doppler Range Measurements to Demonstrate Signal Multipath Effects In: Proceedings of the Fourth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Austin, Texas, pp.573-587. (1989).
- [96] EVANS, A.G., HERMANN, B.R., A Comparison of Several Techniques to Reduce Signal Multipath from the Global Positioning System. In: Bock, Leppard (eds.), pp.74-81, (1990).
- [97] ROCKEN, C., MEERTENS, C.M., GPS Antenna and Receiver Tests; Multipath Reduction and Mixed Receiver Baselines, (1991).
- [98] KLEUSBERG, A., A Review of Kinematic and Static GPS Surveying Procedures in GPS '90, (1990).
- [99] SPILKER, J.J., GPS Signal Structure and Performance Characteristics ION, Volume I, Washington D.C., pp. 36 - 37 ; 53-54, (1978).
- [100] WELLS, D., Guide to GPS Positioning. Canadian GPS Associates, (1986).

- [101] EVANS, A.G., Measurements Analysis for Signal Multipath, Spring 1985 GPS Precision Baseline Test , presented at Fall Meeting of American Geophysical Union, San Francisco ,December 8-13, (1985).

- [102] BISHOP, G.J., KLOBUCHAR, J.A., DOHERTY,P.H., Multipath Effects on the Determination of Absolute Ionospheric Time Delay from GPS Signals. Radio Science, vol.20, No.3, pp.388-396, (1985).

- [103] SEEBER,G. , Precise Height Determination With GPS Concepts and Realization. Institut für Erdmessung University Hannover, (1992).

- [104] COUNSELMAN, C.C., Miniature Interferometer Terminals for Earth Surveying- MITES. CSTG Bulletin Vol.3, International Activities, Technology and Mission Developments, (1981).

- [105] KNIGHT,J.E., RHOADES, K.W., Differential GPS Static and Dynamic Test Results. The ION Satellite Division. Proceedings of the Satellite Division. First Technical meeting ,Colorado Springs ,(1987).

- [106] BLEWITT, G., VanDAM,T., HEFLIN,M.B., Atmospheric Loading Effects and GPS Time Averaged Vertical Positions. AGU Spring Meeting, May 23-27, Baltimore, (1994).

EK-A. TROPOSFERİK GECİKME DÜZELTMESİ FORMÜLLERİ

A- Saastamoinen Modeli

[59]'da troposferik uzunluk düzeltmesi (range-correction)

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

ile verilmektedir. Burada,

ΔS_{trop}^z : metre biriminde uydu-alıcı uzaklığına gelecek olan düzeltmeyi,

Z : uydu zenit uzaklığını,

P : atmosferik basınç(mbar),

T : Mutlak sıcaklık (°C),

e : Su buharı basıncı,

B : Noktanın yüksekliğinden dolayı tablodan alınacak katsayı,

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

$TD = 273.15 + T$ kabul edilirse;

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

Burada, H : Nisbi nem (relative humidity) olarak verilmektedir. B katsayısı için standart düzeltme değerleri Tablo-A.1'de, δL için ise Tablo-A.2'de verilmektedir.

Tablo-A.1. B Katsayısı İçin 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

Tablo-A.2. δL Düzeltme Terimleri (metre)

Görünen Zenit Uzaklığı	Deniz Seviyesinden Olan 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	+0.001	+0.001
66°00'	+0.006	+0.006	+0.005	+0.005	+0.004	+0.003	+0.003	+0.002
70°00'	+0.012	+0.011	+0.010	+0.009	+0.008	+0.006	+0.005	+0.004
73°00'	+0.020	+0.018	+0.017	+0.015	+0.013	+0.011	+0.009	+0.007
75°00'	+0.031	+0.028	+0.025	+0.023	+0.021	+0.017	+0.014	+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

B. " MODIFIED HOPFIELD" MODELİ

Su buharı etkisi yaklaşık 11 km den sonra gözardı edilebileceğinden ve 11 km den sonra 40 km ye kadar ise hava basıncının etkisinin önemli ölçüde varolduğu düşünülürse troposferik uzaklık düzeltmesi burada iki bileşene ayrılabilir.

- Kuru bileşen;

$$N_d = 0.776E-4. P/TD \quad (A.3)$$

ile verilmekte olup bunun için yükseklik

$$h_d = 40.136 + 0.14872.(TD-273.16) \text{ km} \quad (A.4)$$

olarak hesaplanmaktadır.

- Islak bileşen;

$$N_w = 0.373. e/TD/TD \quad (A.5)$$

$$h_w = 11 \text{ km}$$

olarak verilmektedir. Ayrıca, gözlemcinin yarıçapı,

$$R_u = 6378 + h_u/1000 \text{ km} \quad (A.6)$$

yükseklik açısı,

$$E=90-Z \quad (A.7)$$

ile verilmektedir. Sonuç olarak troposferik uzaklık düzeltmesi Bernese yazılımında aşağıdaki işlem adımları uygulanarak hesaplanmaktadır;

a. Islak bileşenin üst kısmına kadar olan eğik mesafe aşağıdaki eşitlikle hesaplanmakta,

$$R_w = \sqrt{(R_u + h_w)^2 - (R_u \cdot \cos E)^2} - R_u \cdot \sin E \quad (A.8)$$

b. Islak bileşen katsayıları hesaplanmakta,

$$A_w = -\sin E / h_w \quad (A.9)$$

$$B_w = -\cos^2 E / 2h_w R_u \quad (A.10)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{1,w} &= 1 \\ \alpha_{2,w} &= 4 \cdot A_w \\ \alpha_{3,w} &= 6A_w^2 + 4B_w \\ \alpha_{4,w} &= 4A_w(A_w^2 + 3B_w) \\ \alpha_{5,w} &= A_w^2 + 12A_w^2 \cdot B_w + 6B_w^2 \\ \alpha_{6,w} &= 4A_w B_w (A_w^2 + 3B_w) \\ \alpha_{7,w} &= B_w^2 \cdot (6A_w^2 + 4B_w) \\ \alpha_{8,w} &= 4A_w \cdot B_w^3 \\ \alpha_{9,w} &= B_w^4 \end{aligned} \quad (A.11)$$

c) Islak bileşene getirilecek düzeltme hesaplanmakta

$$\Delta S_w^z = N_w \cdot 10^3 \sum_{i=1}^9 \left(\frac{\alpha_{i,w}}{Z} R_w^i \right) \quad (A.12)$$

d) Aynı işlem adımları kuru bileşen ΔS_d^z için de tekrar edilmekte,

e) Sonuç troposferik uzaklık düzeltmesi

$$\Delta S_{trop}^z = \Delta S_w^z + \Delta S_d^z \quad (A.13)$$

ile hesaplanmaktadır.

Bu formülle bulunan sonuç ile Saastamoinen modelinden yararlanarak hesaplanan düzeltmeler 10-90 derece arasındaki zenit uzaklıklarında yaklaşık aynı sonuçları vermekte olup aradaki farklar 1 cm'nin altında kalmaktadır.

C. " SIMPLIFIED HOPFIELD" MODELİ

Burada da troposferik uzaklık düzeltmesi kuru ve ıslak bileşenlerle aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir.

$$K_W = 7.46512E-2 \cdot e / TD^{**2} \cdot (11000 - h_u) \quad (A.14)$$

$$K_D = 1.552E-5 \cdot P / TD \cdot ((148.72TD - 488.3552) - h_u) \quad (A.15)$$

$$\Delta S_{trop}^z = \frac{K_D}{\sin(\sqrt{E^2 + 6.25} \frac{\pi}{180})} + \frac{K_W}{\sin(\sqrt{E_t^2 + 2.25} \frac{\pi}{180})} \quad (A.16)$$

D. CHAO MODELİ

Bu modelde troposferik uzaklık düzeltmesi ,

$$\Delta S_{trop}^z = C_W \cdot F_W + C_D \cdot F_D \quad (A.17)$$

ile verilmektedir. Burada C_W ve C_D sırasıyla ıslak ve kuru bileşenleri, F_W ve F_D ise sırasıyla ıslak ve kuru bileşenler için projeksiyon fonksiyonlarıdır ve aşağıdaki eşitliklerle verilmektedir [48].

$$C_d = 470 \frac{e_{uc}^{1.23}}{TD^2} + 10230 \frac{e_{uc}^{1.46}}{TD^3} \quad (A.18)$$

$$C_d = 0.002276 \cdot P \quad (A.19)$$

$$e_{uc} = \frac{H_u}{100} \cdot 35.65 \times 10^{(7.617 - \frac{2285}{TD})} \quad (A.20)$$

$$F_w = \frac{1}{\sin E + \frac{0.0003 \cdot S}{0.0170 + \tan E}} \quad (A.21)$$

$$F_d = \frac{1}{\sin E + \frac{0.00143}{0.0445 + \tan E}} \quad (\text{A.22})$$

Chao modeli ve Modified Hopfield modeli ile elde edilen sonuçlar(10-90 derece arasında) genelde 5 cm den küçük farklar göstermektedir. Chao modelinde sinyal yolunun eğikliğinden dolayı olan düzeltme de dikkate alındığından bu durum özellikle uzun bazların değerlendirilmesinde diğer modellere göre bir üstünlük olarak düşünülebilir.

E. ESSEN-FROOME DİFERANSİYEL MODELİ

Bu modelde troposferik uzaklık düzeltmesi bir bazın iki ucundaki noktalar arasında kalan bölge için (AA_0) geleneksel kırılma formülleri ile hesaplanmaktadır (Şekil-A.1.). B noktasının üzerinde kalan bölge (A_0S) için ise standart Saastamoinen veya Hopfield modelleri kullanılmakta ve burada A_0 kuramsal nokta yüksekliğinin üzerindeki tüm noktalar için aynı meteorolojik parametrelerin mevcut olduğu kabul edilmektedir.

Essen-Froome formüllerindeki kırılma indisi [35]' de

$$n_i = (77.64 \cdot \frac{P}{TD} - 12.96 \frac{e}{TD} + 371780 \frac{e}{TD^2}) \cdot 10^{-6} \quad (\text{A.23})$$

i= A, B (A ve B noktaları için)

ile verilmektedir. Böylece A ve B noktaları arasındaki düzeltme

$$\Delta S^{A_0} = \frac{n_A + n_B}{2} \cdot l \quad (\text{A.24})$$

ile hesaplanabilir. Burada,

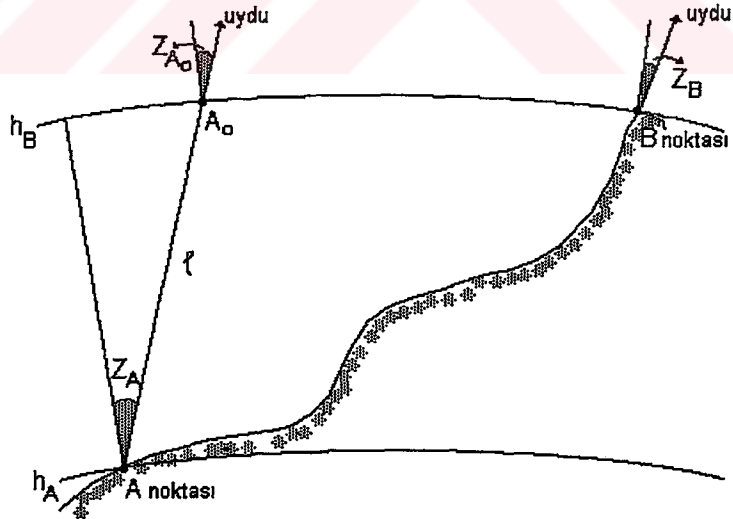
$$l = \frac{h_B - h_A}{\sin E_A} \quad (\text{A.25})$$

h_A , h_B : noktaların deniz yüzeyinden olan yükseklikleri,
 E_A : en düşük noktadaki uydu zenit açısı ($\cos Z_A$).

Toplam troposferik uzaklık düzeltmesi ise,

$$\Delta S_{\text{trop}}^Z = \Delta S_A^{A^0} + \Delta S_{A_0}^Z \quad (\text{A.26})$$

ile hesaplanabilir.



Şekil-A.1. Essen-Froome Diferansiyel Modeli

ÖZGEÇMİŞ

Muzaffer KAHVECİ, 10.02.1962 tarihinde Kahraman Maraş'ta doğmuştur. İlk ve Orta öğrenimini İstanbul Pirireis İlköğretim okulunda tamamladıktan sonra 1977 yılında Kuleli Askeri Lisesi'ne girmiştir. 1981 yılında Kuleli Askeri Lisesi'ni, 1985 yılında da Kara Harp Okulu'nu bitirmiş ve aynı yıl harita subayı olarak Harita Genel Komutanlığı bünyesinde mevcut Harita Yüksek Teknik Okulu'nda öğrenimine devam etmiştir. 1987 yılında bu okuldan harita mühendisi ünvanı ile mezun olmuş ve Harita Genel Komutanlığı Jeodezi Dairesi Başkanlığı'nda göreve başlamıştır. Söz konusu Daire'de 2 yıl çeşitli arazi ölçülerine aktif olarak katılmış, daha sonra Türkiye Jeoid'i oluşturma projesi (TG-91)'nin bir aşamasını oluşturan Türkiye koşullarında dolaylı etki hesabında görev almıştır. 1991, 1992 ve 1996 yıllarında toplam 15 ay süre ile Alman Uygulamalı Jeodezi Enstitüsü (IfAG)'nde Kuzey Anadolu Fay Hattı ve Batı Anadolu Bölgelerinde yapılmış olan GPS ölçülerini değerlendirme çalışmalarına katılmış olup aynı kurum tarafından kendisine 1991 yılında sertifika verilmiştir. 1991 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimine başlamış ve 1993 yılında yüksek mühendis ünvanını almıştır. 1993 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde doktora eğitimine başlamıştır.

Halen, Harita Genel Komutanlığı Jeodezi Dairesi Başkanlığı'nda görev yapmakta olup teorik ve uygulamalı GPS çalışmalarına katılmaktadır.

Evli, 1 çocuk babasıdır. Yabancı dili İngilizce'dir.