

127193

**SİNYAL KALİTESİNE DAYALI STOKASTİK
MODELLERİN GPS İLE KONUM BELİRLEME
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNE İLİŞKİN BİR İNCELEME**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. M. Tefik ÖZLÜDEMİR
(501932015)

TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Ağustos 2002
Tezin Savunulduğu Tarih : 22 Kasım 2002

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Tefik AYAN
Diğer Jüri Üyeleri Doç.Dr. Ersoy ARSLAN (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Hüseyin DEMİREL (Y.T.Ü.)
Prof.Dr. Rasim DENİZ (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Tamer ÜNAL (Y.T.Ü.)

(Handwritten signatures of the jury members)

KASIM 2002

127193

ÖNSÖZ

Çalışmam süresince değerli katkıları ile bana her konuda destek ve yardımcı olan ve beni yönlendiren değerli hocam sayın Prof. Dr. Tevfik AYAN'a teşekkür ederim. Ayrıca Graz Teknik Üniversitesi'nde bulunduğum süre içinde tezin alt yapısını oluşturan çalışmalarına yaptıkları katkılarından dolayı Prof. Dr. Fritz K. Brunner, Horst Hartinger, Ekkehart Grillmayer ve Andreas Wieser'e; çalışmam boyunca destekleri ve anlayışlılıklarıyla bana güç veren İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi Anabilim Dalı'ndaki çalışma arkadaşlarıma; verdiği bursla Graz Teknik Üniversitesi'ndeki çalışmalarımı sürdürme olanağını sağlayan Avusturya Akademik Değişim Servisi'ne (ÖAD - Österreichischer Akademischer Austauschdienst), destekleriyle moral ve motivasyonumu güçlendiren yaklaşık dört yıl önce kaybettiğim anneme, aileme ve kız arkadaşıma içten teşekkürlerimi sunarım.

AĞUSTOS 2002

M. Tevfik ÖZLÜDEMİR

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	x
ÖZET	xii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ	1
2. GLOBAL KONUM BELİRLEME SİSTEMİ	6
2.1. Giriş	6
2.2. Sistem Bileşenleri	7
2.2.1 Uzay bölümü	7
2.2.2 Kontrol bölümü	9
2.2.3 Kullanıcı bölümü	10
2.3. GPS Sinyal Yapısı	12
2.4. GPS Ölçüleri	15
2.5. GPS İle Konum Belirleme	17
3. BAĞIL KONUM BELİRLEME VE HATA KAYNAKLARI	19
3.1. Tek Fark (Single Differencing)	19
3.2. Çift Fark (Double Differencing)	21
3.3. GPS'de Hata Kaynakları	22
3.3.1. Uydu yörünge hataları	23
3.3.2. İyonosferik gecikme	24
3.3.3. Troposferik gecikme	26
3.3.4. Alıcının noise etkisi	27
3.3.5. Multipath	28
4. GPS SINYALLERİ ÜZERİNDEKİ TROPOSFERİK ETKİLER	30
4.1. Troposferik Kırılma ve Gecikme	30
4.2. Zenit Gecikme Modelleri ve Mapping Fonksiyonları	33
4.2.1. Hopfield modeli	34
4.2.2. Saastamoinen modeli	35
4.2.3. Marini mapping fonksiyonu	37
4.2.4. Chao mapping fonksiyonu	38
4.2.5. Lanyi mapping fonksiyonu	39
4.2.6. CfA2.2 mapping fonksiyonu	40
4.2.7. MTT mapping fonksiyonu	41

4.2.8. İfadis mapping fonksiyonu	43
4.2.9. Niell mapping fonksiyonu (NMF)	44
4.2.10. UNSW931 mapping fonksiyonu	45
4.3. Model Karşılaştırmaları	46
5. GPS ÖLÇÜLERİNİN STOKASTİK ÖZELLİKLERİ	52
5.1. Giriş	52
5.2. GPS Sinyal Kalitesi Ölçütleri	54
5.2.1. Signal-noise oranı	55
5.2.2. Taşıyıcı-noise güç yoğunluk oranı	56
5.3. Olası Ağırlıklandırma Algoritmaları	58
5.3.1. Sigma- ϵ ağırlık modeli	59
5.3.2. Sigma- Δ ağırlık modeli	60
6. SAYISAL UYGULAMA	64
6.1. Kısa Baz Kenarlarında Uygulama	64
6.1.1. Veri analizi	66
6.1.1.1. Ön değerlendirme	66
6.1.1.2. Sabit verilerin değerlendirilmesi	70
6.1.1.3. Düşey hareket uygulanan verilerin analizi	78
6.1.2. Sonuçların değerlendirilmesi	79
6.2. Uzun Baz Kenarlarında Uygulama	87
6.2.1. Sonuçların değerlendirilmesi	92
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	95
KAYNAKLAR	100
EKLER	108
ÖZGEÇMİŞ	122

KISALTMALAR

BPSK	: Binary Phase Shift Keying
CfA2.2	: Davis vd. mapping fonksiyonu
C/A code	: Coarse/Acquisition code
C/N₀	: Carrier-to-Noise Power Density Ratio
DD	: Double Differenced
DOD	: Department of Defense
DOY	: Day of Year
GDOP	: Geometric Dilution of Precision
GPS	: Global Positioning System
IERS	: International Earth Rotation Service
IF	: Intermediate Frequency
IGS	: International GPS Service
MCS	: Master Control Station
MTT	: Herring mapping fonksiyonu
NAVSTAR	: Navigation System with Time and Ranging
NMF	: Niell Mapping Function
NNSS	: Navy Navigational Satellite System
OCS	: Operational Control Segment
P-code	: Precise (or private) code
PPS	: Precise Positioning Service
PRN	: Pseudo Random Noise
RINEX	: Receiver Independent Exchange Format
RF	: Radio Frequency
RMS	: Root Mean Square
SNR	: Signal-to-Noise Ratio
SPS	: Standard Positioning Service
SVN	: Satellite Vehicle Number
TEC	: Total Electron Content
UNSW931	: Yan ve Ping mapping fonksiyonu
UTC	: Universal Time Coordinated
VLBI	: Very Long Baseline Interferometry
WVR	: Water Vapour Radiometer

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. GPS hata büyüklükleri.....	23
Tablo 6.1. Koordinat bileşenlerinin standart sapmaları, birinci oturum ve ikinci oturum (HEI1-HEI2).....	80
Tablo 6.2. Koordinat bileşenlerinin standart sapmaları, birinci oturum ve ikinci oturum (HEI3-HEI2).....	82
Tablo 6.3 Nokta koordinatları.....	89
Tablo 6.4 Bernese yazılımı ile değerlendirme stratejisi.....	90
Tablo 6.5 Koordinat bileşenlerinin standart sapmaları (mm) KOSG ve POTS istasyonları.....	91



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	: GPS sistem bileşenleri..... 7
Şekil 2.2	: GPS uydu dağılımı..... 8
Şekil 2.3	: GPS kontrol bölümü..... 10
Şekil 2.4	: GPS sinyal bileşenleri..... 13
Şekil 2.5	: GPS sinyali kuvvet spektral yoğunluğu..... 14
Şekil 3.1	: Alıcılar arasında fark..... 19
Şekil 3.2	: Çift fark..... 21
Şekil 3.3	: Atmosferin yapısı..... 25
Şekil 3.4	: Multipath etkisi..... 28
Şekil 5.1	: Ölçülen C/N_0 ve C/N_0 şablonu (Ashtech Dorne Morgolin Choke Ring anteni)..... 61
Şekil 6.1	: HEI1, HEI2 ve HEI3 istasyonları..... 65
Şekil 6.2	: İstasyonların konumsal profilleri..... 65
Şekil 6.3	: HEI2 istasyonunda birinci ve ikinci oturumdaki uydu dağılımı... 67
Şekil 6.4	: Eğim açılara göre tüm uyduların L_1 C/N_0 değerleri..... 68
Şekil 6.5	: HEI3 istasyonundaki ölçü kayıpları, 1. Oturum ve 2. Oturum.... 69
Şekil 6.6	: HEI2 istasyonundaki uydu dağılımı..... 70
Şekil 6.7	: HEI2 istasyonunun kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri, 1. oturum ve 2. Oturum..... 71
Şekil 6.8	: HEI2 istasyonunun kuzey, doğu ve yükseklik bileşenleri, 1. oturum ve 2. Oturum (PRN 26 ilk oturumda değerlendirme dışında tutulmuştur)..... 71
Şekil 6.9	: HEI2 istasyonunun koordinatları için spektral güç yoğunlukları. 72
Şekil 6.10	: HEI1-HEI2 baz çözümü için DD düzeltmeleri (1. Oturum)..... 73
Şekil 6.11	: HEI1-HEI2 baz çözümü için DD düzeltmeleri (2. Oturum)..... 74
Şekil 6.12	: PRN04, PRN07 ve PRN24 için ilk oturumdaki DD düzeltmeleri ve eğim açıları..... 74
Şekil 6.13	: DD düzeltmeleri ve C/N_0 farkları eğim açısına karşı..... 75
Şekil 6.14	: C/N_0 farkları ve DD düzeltmeleri için yarı logaritmik ölçekli PSD fonksiyonu..... 76
Şekil 6.15	: HEI1 istasyonunda PRN09 için C/N_0 değerleri (iz 1) HEI2 istasyonunda PRN09 için C/N_0 değerleri (iz 2) HEI1 istasyonunda PRN24 için C/N_0 değerleri (iz 3) HEI2 istasyonunda PRN24 için C/N_0 değerleri (iz 4) DD düz. ve C/N_0 farkları (iz 5)..... 77
Şekil 6.16	: Uygulanan düşey hareketi de içeren ölçme periyodu..... 78
Şekil 6.17	: HEI2 istasyonundaki uydu dağılımı, 1. ve 2. oturum..... 78
Şekil 6.18	: Birinci oturumdaki koordinat çözümlerinin standart sapmaları (HEI1-HEI2)..... 81

Şekil 6.19	: İkinci oturumdaki koordinat çözümlerinin standart sapmaları (HEI1-HEI2).....	81
Şekil 6.20	: Birinci oturumdaki koordinat çözümlerinin standart sapmaları (HEI3-HEI2).....	83
Şekil 6.21	: İkinci oturumdaki koordinat çözümlerinin standart sapmaları (HEI3-HEI2).....	83
Şekil 6.22	: İkinci oturumda HEI1-HEI2 için DD değerleri	84
Şekil 6.23	: İkinci oturumda HEI3-HEI2 için DD değerleri	85
Şekil 6.24	: PRN04, PRN09 ve PRN29 için ikinci oturumdaki DD düzeltmeleri ve eğim açıları.....	85
Şekil 6.25	: DD düzeltmeleri ve C/N_0 farkları eğim açısına karşı.....	86
Şekil 6.26	: Değerlendirmeye konu olan IGS noktaları.....	88
Şekil 6.27	: KOSG istasyonu için koordinat çözümlerinin standart sapmaları	91
Şekil 6.28	: POTS istasyonu için koordinat çözümlerinin standart sapmaları	92
Şekil 6.29	: 2001 yılı 300-307. günleri arasında kuzey bileşeni çözümü Cos^2z modeli ile ağırlıklandırılmış, minimum eğim açısı 5°	93
Şekil 6.30	: 2001 yılı 300-307. günleri arasında kuzey bileşeni çözümü Eş ağırlıklı, minimum eğim açısı 5°	94
Şekil A.1	: HEI2 istasyonunun kuzey, doğu ve yükseklik bileşeni, birinci oturum ve ikinci oturum, HEI1-HEI2 baz kenarı Sigma- ϵ modeli ve 5° eğim açısı ile çözüm Eş-ağırlık modeli ve 5° eğim açısı ile çözüm.....	108
Şekil A.2	: HEI2 istasyonunun kuzey, doğu ve yükseklik bileşeni, birinci oturum ve ikinci oturum, HEI1-HEI2 baz kenarı Sigma- ϵ modeli ve 10° eğim açısı ile çözüm Eş-ağırlık modeli ve 10° eğim açısı ile çözüm.....	109
Şekil A.3	: HEI2 istasyonunun kuzey, doğu ve yükseklik bileşeni, birinci oturum ve ikinci oturum, HEI1-HEI2 baz kenarı Sigma- ϵ modeli ve 15° eğim açısı ile çözüm Eş-ağırlık modeli ve 15° eğim açısı ile çözüm.....	110
Şekil A.4	: HEI2 istasyonunun epok-epok koordinatları için spektral güç yoğunluğu, birinci ve ikinci oturum, HEI1-HEI2 baz kenarı Sigma- ϵ modeli ile çözüm, Eş ağırlık modeli ile çözüm 5° , 10° ve 15° eğim açıları ile çözüm.....	111
Şekil A.5	: HEI2 istasyonunun kuzey, doğu ve yükseklik bileşeni, birinci oturum ve ikinci oturum, HEI3-HEI2 baz kenarı Sigma- ϵ modeli ve 5° eğim açısı ile çözüm Eş-ağırlık modeli ve 5° eğim açısı ile çözüm.....	112
Şekil A.6	: HEI2 istasyonunun kuzey, doğu ve yükseklik bileşeni, birinci oturum ve ikinci oturum, HEI3-HEI2 baz kenarı Sigma- ϵ modeli ve 10° eğim açısı ile çözüm Eş-ağırlık modeli ve 10° eğim açısı ile çözüm.....	113
Şekil A.7	: HEI2 istasyonunun kuzey, doğu ve yükseklik bileşeni, birinci oturum ve ikinci oturum, HEI3-HEI2 baz kenarı Sigma- ϵ modeli ve 15° eğim açısı ile çözüm Eş-ağırlık modeli ve 15° eğim açısı ile çözüm.....	114
Şekil A.8	: HEI2 istasyonunun epok-epok koordinatları için spektral güç yoğunluğu, birinci ve ikinci oturum, HEI3-HEI2 baz kenarı Sigma- ϵ modeli ile çözüm, Eş ağırlık modeli ile çözüm 5° , 10° ve 15° eğim açıları ile çözüm.....	115

Şekil B.1	: KOSG istasyonunun kuzey bileşeni, WSRT-KOSG baz kenarı ağırlıklı ve eş ağırlıklı çözüm ilk satır: 15° eğim açısı, ikinci satır: 10° eğim açısı, üçüncü satır: 5° eğim açısı ile çözüm.....	116
Şekil B.2	: KOSG istasyonunun doğu bileşeni, WSRT-KOSG baz kenarı ağırlıklı ve eş ağırlıklı çözüm ilk satır: 15° eğim açısı, ikinci satır: 10° eğim açısı, üçüncü satır: 5° eğim açısı ile çözüm.....	117
Şekil B.3	: KOSG istasyonu yükseklik bileşeni, WSRT-KOSG baz kenarı ağırlıklı ve eş ağırlıklı çözüm ilk satır: 15° eğim açısı, ikinci satır: 10° eğim açısı, üçüncü satır: 5° eğim açısı ile çözüm.....	118
Şekil B.4	: POTS istasyonunun kuzey bileşeni, WSRT-KOSG baz kenarı ağırlıklı ve eş ağırlıklı çözüm ilk satır: 15° eğim açısı, ikinci satır: 10° eğim açısı, üçüncü satır: 5° eğim açısı ile çözüm.....	119
Şekil B.5	: POTS istasyonunun doğu bileşeni, WSRT-KOSG baz kenarı ağırlıklı ve eş ağırlıklı çözüm ilk satır: 15° eğim açısı, ikinci satır: 10° eğim açısı, üçüncü satır: 5° eğim açısı ile çözüm.....	120
Şekil B.6	: POTS istasyonu yükseklik bileşeni, WSRT-KOSG baz kenarı ağırlıklı ve eş ağırlıklı çözüm ilk satır: 15° eğim açısı, ikinci satır: 10° eğim açısı, üçüncü satır: 5° eğim açısı ile çözüm.....	121

SEMBOL LİSTESİ

A_P, A_C	: P kodu ve C/A kodu büyüklükleri
β	: Sıcaklığın yüksekliğe bağlı değişimi
B_P	: L_2 sinyal büyüklüğü
c	: Işık hızı
d_e	: Uydu ve alıcı donanım gecikmesi
d_h, d_w	: Hidrostatik ve ıslak gecikme
d_{ion}	: İyonosferik gecikme hatası
d_p	: Yörünge hatası
d_t	: Uydu saat hatası
d_T	: Alıcı saat hatası
d_{trop}	: Troposferik gecikme hatası
d_{trop}^z	: Troposferik zenit gecikmesi
D	: Navigasyon veri akışı
D_s	: Ölçek yüksekliği
ε	: Yer istasyonundaki refrakte olmamış eğim açısı
ε_{Mp}	: Kod uzunluğu multipath hatası
$\varepsilon_{M\Phi}$: Taşıyıcı faz multipath hatası
ε_{Φ}	: Alıcı taşıyıcı faz noise değeri
ε_P	: Alıcı kod noise değeri
e_0	: Kısmi su buharı basıncı
φ	: Enlem
F_s	: Frekans çarpımı
f_1, f_2	: L_1 ve L_2 frekansları (Hz)
g	: Yerçekimi ivmesi
h	: Kullanıcının referans elipsoidinden yüksekliği
h_h, h_w	: Hidrostatik ve ıslak terim ölçek yükseklikleri
h_t	: Tropoz yüksekliği
H	: Atmosferin efektif yüksekliği
I	: Normalize edilmiş efektif zenit argümanı
λ	: Taşıyıcı dalga boyu
m_h, m_w	: Mapping fonksiyonunun hidrostatik ve ıslak bileşenleri
M	: Havanın molar kütlesi
n	: Kırılma indisi
N	: Tamsayı çevrim belirsizliği
N	: Noise
$N_{h,0}, N_{w,0}$: Yüzeydeki hidrostatik ve ıslak kırılma indisi
P	: Ölçülen kod uzunluğu
P_d	: Atmosferdeki kuru gazların kısmi basıncı
P_m	: İzleme istasyonundaki barometrik basınç
P_n	: Noise gücü
P_s	: Sinyal gücü

P_x	: Güç spektral yoğunluk çarpımı
P_0	: Yüzey basıncı
Φ	: Ölçülen taşıyıcı faz
Φ_1, Φ_2	: L_1 ve L_2 için küçük faz noise ve osilatör sürüklenme bileşeni
ρ	: Uydu ve alıcı arasındaki geometrik uzunluk
r	: Jeosentrik yarıçap
r_a	: Nötral atmosferin üstünün jeosentrik yarıçapı
r_{at}	: İzleme istasyonundaki antenin jeosentrik yarıçapı
r_h	: Troposferik hidrostatik yarıçap
r_i	: Pseudorange
r_m	: Yer merkezinden meteorolojik algılayıcılara olan uzunluk
r_r	: Alıcı antenin jeosentrik yarıçapı
r_T	: Tropopoz yarıçapı
r_0	: İstasyonun jeosentrik yarıçapı
R	: Evrensel gaz sabiti
R_e	: Yeryüzü yarıçapı
σ_ϕ	: RMS faz noise değeri
S	: Sinyal
T	: Mutlak sıcaklık
T_0	: İstasyondaki sıcaklık
x_i, y_i, z_i	: i uydusunun koordinatları
x_u, y_u, z_u	: Kullanıcı koordinatları
X_P, X_C	: P ve C/A kodları
ω_1, ω_2	: L_1 ve L_2 frekansları (rad/s)
ψ	: Görünen zenit açısı
z	: Gerçek zenit açısı
Z_d, Z_w	: Kuru hava ve su buharının sıkıştırılabilirlik faktörü

SİNYAL KALİTESİNE DAYALI STOKASTİK MODELLERİN GPS İLE KONUM BELİRLEME ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNE İLİŞKİN BİR İNCELEME

ÖZET

Global Konum Belirleme Sistemi (GPS – Global Positioning System) başlangıçta askeri ihtiyaçlar doğrultusunda navigasyon amacıyla geliştirilmiş bir konum belirleme tekniğidir. Ancak GPS sonraları sivil kullanıcılar tarafından da yüksek doğruluklu konum belirleme uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde sivil yaşamın pek çok alanında GPS yaygın olarak kullanılmaktadır.

GPS uygulamalarında çeşitli hata kaynakları ölçüleri etkilemektedir. Bu hata kaynakları uydu ve alıcı saat hataları, uydu yörünge hataları, uydular tarafından yayınlanan elektromanyetik dalganın atmosferden geçişi sırasında maruz kaldığı iyonosferik ve atmosferik gecikme etkileri, multipath, alıcı hataları şeklinde sıralanabilir. Uydu-saat alıcı hataları uygulanan uygun ölçme teknikleri ile en aza indirilebilmektedir. Son yıllarda çok sayıda sabit istasyon aracılığıyla uydu yörünge bilgilerinin çok daha hassas bir şekilde elde edilebilmesiyle de uydu yörünge hataları ihmal edilebilir hale gelmiştir. Alıcı hatalarının teknolojik gelişme ile birlikte azalması ve uydu dağılımının, dolayısıyla geometrinin devreye sokulan yeni uydularla her koşulda yeterli olması bu hata kaynaklarının, özellikle de lokal çalışmalardaki etkilerini büyük oranda azaltmıştır. İyonosferik gecikme etkisi de çift frekansta ölçme yapılması ile büyük oranda ortadan kaldırılabilmektedir. Dolayısıyla, GPS ölçmelerindeki en önemli hata kaynaklarının uydu tarafından gönderilen elektromanyetik dalganın, alıcı çevresinde bulunan yansıtıcı yüzeylerden yansması nedeniyle oluşan multipath etkisi ve dalganın kırılma etkisi nedeniyle troposferden geçişi sırasında gerçekleşen gecikme etkisi olduğunu söyleyebiliriz. Her iki hata da, uydu eğim açısı, yani yatay düzlemde uydu ile alıcı arasındaki açı küçüldükçe artmaktadır. Bu nedenle, uygulamada 15° - 20° ve daha büyük eğim açılı ölçüler kullanılmakta ve böylece multipath ve troposferik gecikme etkisi nedeniyle bozulan ölçüler işleme katılmamaktadır. Bu durumda pek çok mühendislik uygulaması için gerekli olan doğruluğa rahatlıkla ulaşılmaktadır. Ancak, yüksek doğruluk gerektiren uygulamalar için ulaşılan bu doğruluk yeterli olamayabilmektedir. Nokta konum doğruluğunu artırmanın bir yolu, daha fazla sayıda ölçünün değerlendirilmeye alınmasıdır. Bu da düşük eğim açılı ölçülerin değerlendirmeye katılmasıyla olanaklı olabilir. Bu durumda uydu geometrisi de iyileşecektir. Ayrıca yapılan çalışmalar, düşük eğim açılı ölçülerin işleme katılmasının GPS ile elde edilen ve multipath ve troposferik gecikme nedeniyle yatay konum doğruluğuna göre yaklaşık üç kat daha düşük olan yükseklik bileşeni doğruluğunu da iyileştirdiğini ortaya koymaktadır. Son yıllarda bir çok bilim insanı, düşük eğim açılı ölçülerin de değerlendirilebilmesi konusu üzerine yoğunlaşmıştır.

Bu çalışmaların biri, troposferik gecikmenin meteorolojik verilere ya da matematiksel yöntemlere dayalı olarak modellenmesi amacıyla üretilen mapping fonksiyonlarının geliştirilmesidir. Hesaplanan troposferik gecikme değerleri ölçülere düzeltme olarak getirilmektedir. Bu noktada sorun troposferin ya da bütün olarak atmosferin doğasının tam olarak anlaşılammış olmasıdır. Son yıllarda meteoroloji alanındaki teknolojik ilerlemeye koşut gelişmeler ve giderek artan atmosferik veri ve bilgi sayesinde bu konuda önemli bir aşama kaydedilmiş, bölgesel ya da global meteorolojik verilerin kullanımıyla çok sayıda mapping fonksiyonu üretilmiştir. Bu fonksiyonlar, ya da bir başka deyişle atmosferik modeller, düşük eğim açılı ölçülerin değerlendirilmesinde geleneksel atmosferik modellere göre daha iyi sonuç vermektedir. Bilim dünyasını meşgul eden bir diğer konu ise, daha önce belirtildiği gibi elektromanyetik dalganın yeryüzündeki objelerden yansması, dolayısıyla gerçek uzunluğundan daha uzun bir yol katederek alıcıya ulaşması ile ortaya çıkan multipath etkisidir. Bugüne dek, multipath etkisini yaratan etmenler somut olarak ortaya konamamıştır. Ancak bu konuda yapılan çalışmalar her bir noktadaki multipath etkisinin birbirini izleyen günlerde yapılan ölçüler üzerinde benzer bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu da konu üzerinde yoğunlaşanları multipath etkisinin modellenmesi üzerine çalışmaya yöneltmiştir. Bu çalışmalarda önemli bir ilerleme kaydedildiğini söyleyebiliriz. Bu tür bir çalışma, yüksek doğruluk gerektirmeyen mühendislik uygulamalarında kullanılmayabilir; ancak konum değişimlerinin gerçek zamanlı izlenebilmesi amacıyla tesis edilen ve sürekli veri toplayan sabit istasyonlar açısından düşünüldüğünde multipath etkisinin modellenmesi ve düzeltme getirilmesi yoluyla elimine edilmesi büyük önem taşımaktadır. En küçük bir konum değişiminin saptanmasının bile büyük önem taşıdığı barajlarda, heyelan ve deprem bölgelerinde tesis edilen noktaların, insanların güvenliği açısından yüklendiği işlev göz önünde bulundurulduğunda bunun önemi daha iyi anlaşılabilir. Üçüncü konu ise düşük eğim açılı GPS ölçülerinin değerlendirilebilmelerine olanak sağlayan yeni stokastik modeller ya da ağırlık modellerin geliştirilmesidir. Geleneksel olarak GPS ölçüleri eşit ağırlıklı olarak dengeleme işlemine sokulmaktadır. Uygun olarak seçilen ağırlık algoritmalarıyla düşük eğim açılı ölçüler de en küçük kareler dengelemesinde kullanılabilir. Bu ağırlık algoritmaları uydu eğim açısına ya da bazı sinyal kalitesi ölçütlerine dayanmaktadır.

Bu çalışmada farklı stokastik modeller ve bu modellerin nokta konumlarının belirlenmesi üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bu modeller, temel sinyal kalitesi ölçütü olan sinyal-noise oranına dayalı olan $\Sigma-\epsilon$ ve $\Sigma-\Delta$ modelleridir. Bu modeller GPS ölçüleri üzerinde uygulanmıştır. Bu modellerin uygulanmasıyla daha iyi koordinat çözümünün elde edildiği ortaya konmuştur. Ayrıca sonuçlar bu modellerin, özellikle de $\Sigma-\epsilon$ ve $\Sigma-\Delta$ modellerinin multipath etkisinin birbirini izleyen günlerdeki tekrarlanabilirliğini ortaya koymaktadır. Sinyal kalitesine dayalı ağırlık algoritmalarının yanı sıra, uzun baz kenarları için eğim açısına bağımlı bir ağırlık nodeli uygulanmıştır. Bu modellerle elde edilen koordinat çözümleri de oldukça iyidir.

7 bölümden oluşan bu çalışmanın ilk bölümünde sunuş yapılmaktadır. İkinci ve üçüncü bölümlerde ise sırasıyla, GPS'ye genel bakış ve hata kaynaklarıyla birlikte bağıl konum belirleme konuları ele alınmış, Bölüm 4'te geliştirilmiş troposferik modeller incelenmiştir. Bölüm 5'te, bu çalışmada uygulanan stokastik modeller, Bölüm 6'da ise uygulamalar verilmektedir. Sonuçlar Bölüm 7'de ortaya konmaktadır.

AN INVESTIGATION ON THE EFFECT OF SIGNAL QUALITY BASED STOCHASTIC MODELS ON GPS POSITIONING SUMMARY

SUMMARY

Global Positioning System (GPS) is a positioning technique, which was initially developed for navigational purposes with respect to the military requirements. However GPS later started to be used by also the civilian users for high accuracy positioning applications. Today GPS is widely used in many fields of civil life.

In GPS applications several error sources affect the observations. These error sources can be given as satellite and receiver clock errors, satellite orbit errors, ionospheric and tropospheric delay that satellite transmitted electromagnetic wave is subjected while propagating through the atmosphere, multipath and receiver errors. Satellite-receiver clock errors can be minimised by the application of proper measurement techniques. Because in recent years the satellite orbit information can be more precisely obtained by means of several permanent stations, the satellite orbit errors have become negligible. The reduction of the receiver errors by the technological advances and the improvement in the satellite constellation with the new satellites put into function, have decreased the effects of these error sources especially in local studies. Ionospheric delay is also almost completely eliminated through the dual frequency observations. Therefore, we may say that the most important error sources in GPS measurements are the multipath effect, taking place when the electromagnetic wave reflects from the reflecting surfaces around the receiver, and the delay effect that occurs during the propagation of the wave through the troposphere because of the refraction effect. Both errors increase as the satellite elevation cut-off angle, i.e. the angle between the satellite and the receiver on the horizontal plane, decreases. Because of this, in practice the observations over 15° - 20° are used and therefore the observations distorted by the multipath and tropospheric delay effects are not taken into account. In this case, the accuracy required for many engineering applications is easily achieved. However, for high accuracy application this accuracy obtained may not be adequate. A way for improving the accuracy of point positions is to include more observations in the processing. This may be possible by taking the low elevated observations into the processing. In this case, the satellite geometry will also improve. Furthermore, the studies applied show that the inclusion of the low elevated observations in the processing improves also the accuracy of the height component of which accuracy is about three times worse than the accuracy of the horizontal components because of the multipath and tropospheric delay. In recent years many scientists have concentrated on the subject of processing also the low elevated observations.

One of these studies is the development of the mapping functions produced for modelling

the tropospheric delay with respect to the meteorological data or mathematical methods. The computed delay values are applied as corrections to the observations. The problem in this point is that the nature of the troposphere or the atmosphere as a whole is not known properly. In recent years, thanks to the developments in the meteorology parallel to the technological progress and the increasing amount of atmospheric data and information, an important progress in this field has taken place; and through the use of regional or global meteorological data, many mapping functions have been developed. These functions, or in other words the atmospheric models, yield better results when compared to the conventional atmospheric models.

Another subject that concerns the scientific world is, as mentioned before, the multipath effect that takes place by the reflection of the electromagnetic wave from the objects on the earth causing it to have a longer path to reach the receiver. So far the factors causing multipath have not been concretely determined. But the studies on this subject point out that the multipath has a similar effect on the observations made in the sequential days. This fact has oriented the people who concentrated on this topic to work on the modelling of the multipath effect. We may say that an important progress has been made in these studies. Such a study may not be used in some engineering applications not requiring that much accuracy. However, when the permanent stations, established for the purpose of real-time monitoring of positional displacements and collecting data continuously, are considered the modelling of multipath effect and its elimination through corrections have a great importance.

The third subject is the development of new stochastic or weighting models, which enable us to process the low elevated GPS observations too. Conventionally the GPS observations are equally weighted in the adjustment procedure. With suitably chosen weighting algorithms the low elevated data can also be used in the least squares adjustment. These weighting algorithms are based on the satellite elevation cut-off angle or on some signal quality measures.

In this study, signal quality based stochastic models and their impacts on the point positioning are investigated. These models are the $\text{Sigma-}\varepsilon$ and $\text{Sigma-}\Delta$ models that are based on the signal-to-noise ratio, which is the basic signal quality measure. These models have been applied on some GPS measurements collected at short baselines. It has been shown that through the application of these models better coordinate solutions are obtained. The results also show that these models characterise the day-to-day repeatability of the multipath effect. This plays an important role for the studies on the multipath mitigation techniques. In addition to the signal quality based weighting algorithms, an elevation dependent weighting scheme is applied for long baselines. The coordinate solutions through this model are also quite better for the low elevated data.

This study consists of seven chapters. In the first chapter the introduction is presented. In the second and third chapters, an overview of the GPS and the relative positioning with the common error sources are given respectively. In Chapter 4, the conventional and recently developed new tropospheric models are reviewed. Chapter 5 deals with the stochastic models applied in this study. In Chapter 6, the applications and results are given. The conclusions are pointed out in Chapter 7.

1. GİRİŞ

Bir navigasyon sistemi olarak kuruluşundan bu yana, Global Konum Belirleme Sistemi (Global Positioning System – GPS) uygulamalarında büyük gelişmeler kaydedilmiştir. GPS, günümüzde trekking ya da dağcılık gibi günlük aktivitelerden, yer kabuğu hareketlerinin ya da mühendislik yapılarındaki deformasyonların izlenmesi gibi yüksek doğruluk gerektiren çalışmalara varana dek bir çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. GPS uygulamalarındaki hızlı gelişmeler GPS donanımında çeşitli performans gereksinimlerine yol açmıştır. Sonuç olarak, alıcı kalitelerindeki önemli artış ve bilgisayar teknolojisindeki olağanüstü ilerlemeye bağlı olarak gerçekleşen veri analizindeki ilerlemeler, GPS tekniğinin yüksek doğruluk gerektiren bir çok mühendislik ölçmesinde kullanılabilmesine olanak sağlamıştır. Bu gelişmelere örnek olarak, alıcı boyutlarının giderek daha da küçülmesi, bunun yanında veri kayıt ve güç kapasiteleri ile sağladıkları doğruluğun artması ve kinematik ya da hızlı statik ölçme modları gibi analitik tekniklerdeki yenilikler verilebilir. Bu ilerlemeler jeodezi alanındaki bir çok çalışmada GPS tekniğinin birincil teknik olarak kullanılması sonucunu doğurmuştur.

Bu gelişmelere koşut olarak, artan orandaki daha yüksek doğruluk talebi, GPS ile konum belirleme stratejileri, ilgili hata kaynakları ve bu hataların azaltılmasına ya da elimine edilmesine yönelik geliştirilen yöntemlerin yoğunluğuna anlaşılması ihtiyacını ortaya çıkartmıştır. Uygun değerlendirme algoritmalarının, yüksek kaliteli alıcı ve antenlerin kullanılması ve ölçme sürelerinin uzun tutulmasıyla doğruluğu yüksek sonuçlar elde edilebilmektedir. Günümüzde GPS tekniği ile konum belirlemede santimetrenin altındaki bir düzeyde doğruluk sağlanabilmektedir. Konum belirleme doğruluğunun artışına yol açan bir başka etmen ise Selective Availability (SA) uygulamasının 1 Mayıs 2000 tarihinde iptal edilmesidir.

Bununla birlikte, kimi zaman ulaşılan doğruluk tatmin edici olamayabilmektedir. Değerlendirmelerin sonuçları ortak hata kaynaklarından etkilenmektedir. Mutlak konum belirlemede elde edilen doğruluğun SA uygulamasının kaldırılması sonrasında arttığı bilinen bir gerçektir. Bağıl konum belirleme açısından doğruluk olgusunu ele aldığımızda, uydu yörünge hataları, uydu saat hataları gibi bilinen hataların pek çoğunun neredeyse tamamen elimine edildiğini ve bir referans noktasına göre çok yüksek doğruluklu konum ve hız bilgisinin elde edilebildiğini söyleyebiliriz. Böylece, sonuçları en çok etkileyen hata kaynaklarının troposferik gecikme etkisi, multipath ve sinyal difraksiyonu etkileri olduğu vurgulanabilir.

Troposferik gecikme, refraksiyon etkisi nedeniyle dalganın troposferden geçişi sırasında gerekleşiir. GPS lmelerinde, bir çok uygulamada hidrostatik ve ıslak bileşenlerine ayrılarak ele alınan troposferik yayılma gecikmesi, tahmini atmosfer profillerine dayanan uygun troposferik modellerin kullanılmasıyla belirlenebilir. Multipath, elektromanyetik dalganın, konumu belirlenecek noktaya kurulu alıcının çevresindeki yansıtıcı yüzeylerden yansıması sonucunda gerekleşiir. Multipath özellikle de kısa mesafeli statik uygulamalarda ciddi bir problemdir. Çünkü bu uygulamalarda noktalar birbirlerine yakın oldukları için aynı çevresel koşullardan etkilenmektedirler. Multipath etkisini elimine etmenin bir yolu, multipath azaltma (mitigation) tekniklerinin geliştirilmesidir. Sinyal difraksiyonu etkisi ise, GPS uydusu ve anten arasındaki görüş çizgisinde, sinyalin alıcıya ulaşmasını tamamen engellemeyen, ancak sinyal gcnt azaltan bir engel bulunması durumunda gerekleşiir. Multipath ve sinyal difraksiyonu etkileri uygun stokastik modellerin GPS ölülerinin değerlendirilmesinde kullanılmasıyla en aza indirilebilir.

Bütün bunların sonucunda, son dönemde GPS konulu araştırmalar ağırlıklı olarak yukarıda sözü edilen hataların en aza indirilmesini ve dolayısıyla konum belirleme doğruluğunu artırmayı sağlayan farklı algoritmalar üzerinde yoğunlaşmıştır. Yukarıda da vurgulandığı gibi, bu araştırmalar üç grup halinde sınıflandırılabilir: troposferik modellerin (tropospheric mapping function), bazı stokastik modellerin ve multipath azaltma tekniklerinin geliştirilmesi.

Atmosferik etkilerin modellenmesine yönelik araştırma çalışmalarının başlangıcı 20. Yüzyılın ortalarına dek uzanır. GPS ölçmelerinde Hopfield (1969) ve Saastamoinen (1973) tarafından geliştirilen modeller GPS sisteminin devreye girmesinden bu yana ana atmosferik modeller olarak yaygın olarak kullanılmaktadır. Geçtiğimiz yıllarda, çoğu Marini (1972) tarafından önerilen atmosferik modele dayalı olarak bazı yeni atmosferik modeller geliştirilmiştir. Bu modellerin bir çoğu VLBI (Very Long Baseline Interferometry – Çok Uzun Bazlı Enterferometri) verilerinin değerlendirilmesinde kullanılmak üzere geliştirilmiş olsalar da, GPS değerlendirme algoritmalarına da başarıyla uyarlanmışlardır. Bu modeller çok miktarda atmosferik verinin kullanılmasıyla üretildikleri, dolayısıyla atmosferi daha iyi ifade edebildikleri için geleneksel atmosferik modellere göre, özellikle de düşük eğim açılı ölçüler için daha kullanışlıdır. Janes ve diğ. (1991), MacMillan ve Ma (1994), Mendes ve Langley (1994), Niell (1996) ve Bisnath ve diğ. (1997) troposferik gecikme etkisini modelleyen bu atmosferik modelleri kapsamlı olarak analiz etmişlerdir. Bu modeller bir çok uygulamada da kullanılmıştır. Örneğin, Rothacher ve diğ. (1998) bu modellerden birini (Niell, 1996) bölgesel bir ağda toplanan GPS verileri üzerinde kullanmış ve daha iyi koordinat çözümü elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Bu tür atmosferik modellerin kullanımı, özellikle de uzun bazlar için oldukça önemlidir.

GPS kapsamındaki araştırmalarda yaygın olarak üzerinde yoğunlaşılan bir başka konu ise, düşük eğim açılı ölçülerin de değerlendirilebilmesine olanak sağlayan stokastik modeller ya da ağırlık modellerinin geliştirilmesidir. Böylece, minimum eğim açısının 15° 'den 5° 'ye düşürüldüğünü varsayarsak, değerlendirmede kullanılan ölçü sayısı yaklaşık %13 oranında artırılmış olmaktadır. Geleneksel olarak, GPS ölçmeleri dengeleme işleminde eşit ağırlıklı olarak değerlendirilmektedir. Uygun olarak seçilen bir ağırlık algoritması ile, troposferik gecikme etkisi ve multipath gibi hatalardan daha fazla etkilenen düşük eğim açılı veriler de dengelemede kullanılabilir. Bu ağırlık algoritmaları, uydu eğim açısı ya da bazı sinyal kalite ölçütlerine dayanmaktadır. Günümüzde GPS ölçülerinin stokastik modellendirilmesi yönündeki çalışmalar başlangıç aşamasında kabul edilse bile, geçtiğimiz yıllarda bu konuda son derece değerli katkı sağlayan çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, Jin ve de Jong (1996) ölçmelerin varyans değerlerinin eğim açısına bağımlılığını irdelediler. Barnes ve Cross (1998), Teunissen ve

diğ. (1998), Tiberius (1999), ve Tiberius ve Konselaar (1999) gerek kod, gerekse de taşıyıcı faz ölçülerinin zaman korelasyonları ve çapraz korelasyonlarına dayanan stokastik modeller geliştirmişlerdir. Bu konudaki bir diğer yaklaşım ise, stokastik model algoritmalarının geliştirilmesinde sinyal kalite ölçütlerinin kullanılmasıdır. Hartinger ve Brunner (1998a, 1998b), Herring (1998), Wang ve diğ. (1998), Brunner ve diğ. (1999), Lau ve Mok (1999), Satirapod (2001), Satirapod ve diğ. (2001) tarafından yapılan çalışmalar bu yaklaşıma verilebilecek örneklerdir. Bu çalışmalar GPS verilerinin değerlendirilmesine yönelik uygun ağırlık algoritmalarının uygulanabilirliğini ve gerekliliğini ortaya koymuştur.

GPS çalışmalarındaki bir diğer sıcak konu olan multipath azaltma tekniklerinin geliştirilmesine yönelik araştırmalara örnek olarak, Ge ve diğ. (2000, 2002) ve Han ve Rizos (2000) tarafından sürekli GPS istasyonlarında yapılan ölçmelerde kullanılmak üzere, bazı filtreleme algoritmalarına dayalı olarak geliştirilen teknikler verilebilir. Bir diğer örnek, Ray (2000) tarafından gerçekleştirilen GPS kod ve taşıyıcı faz üzerindeki multipath etkisinin bir çoklu anten sistemi kullanılması yoluyla azaltılması konulu çalışmadır. Bu tekniklerin kullanımı, özellikle de sabit GPS izleme istasyonlar açısından önem taşıyor. Ayrıca bu tekniklerin, uygun atmosferik model ve stokastik modellerle birlikte kullanımının konum belirleme doğruluğunu artıracığı ise açıktır.

Bu çalışmada, sinyal kalitesine dayalı olan ve çift fark GPS taşıyıcı faz ölçüleri için geliştirilmiş stokastik modeller araştırılmakta ve bu amaç için kısa baz uzunluklarında toplanmış GPS verisi üzerinde değerlendirilmiştir. Bu modellerin ve veri değerlendirme stratejisinin uygulanma amacı daha önce belirtildiği gibi multipath ve troposferik gecikme etkisinin sonuçlar üzerindeki etkisinin azaltılmasıdır. Kısa baz kenarlarında sinyal kalitesine dayalı ağırlık modellerinin uygulanmasının yanı sıra, uzun baz kenarlarında da, eğim açısına dayalı ağırlık modelleri ile değerlendirme yapılmıştır. Buradaki temel amaçsa, elde edilen çözümlerin tekrar edilebilirliğinin, geleneksel eş ağırlıklı değerlendirme yaklaşımı ile ölçülerin ağırlıklandırıldığı modellerin karşılaştırılması yoluyla irdelenmesidir.

Yedi bölümden oluşan bu çalışmanın ikinci bölümünde GPS sistemi genel olarak, tarihsel arka planı, mevcut durumu, bileşenleri ve temel özellikleri ile ele alınmaktadır.

Bölüm 3'te bağıl konum belirleme kavramı ve GPS ölçülerini etkileyen hata kaynakları, Bölüm 4'te ise troposferik modeller detaylı olarak irdelenmiştir. Bölüm 5'te GPS ölçülerinin stokastik özellikleri ve incelenen ağırlık algoritmaları ele alınmakta, takip eden Bölüm 6'da bu modellerin uygulandığı sayısal uygulama örnekleri verilmektedir. Bu bölümde ayrıca, kısa baz çözümlerinde yapay olarak uygulanmış düşey yöndeki hareketlerin elde edilen çözümler üzerindeki etkileri de irdelenmektedir. Sonuçlar ve öneriler Bölüm 7'de sunulmaktadır.



2. GLOBAL KONUM BELİRLEME SİSTEMİ

2.1 Giriş

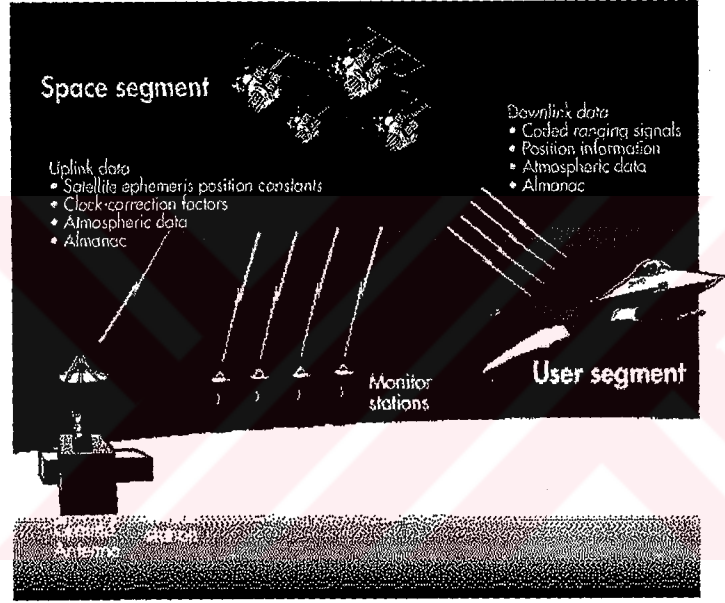
Uydu seyir sistemlerinin konum belirleme amacıyla kullanılması 1960'lı yıllara dayanır. TRANSIT sistemi olarak da adlandırılan Amerikan Donanma Seyir Uydu Sistemi (Navy Navigational Satellite System - NNSS) günümüzün modern konum belirleme sistemi GPS'nin öncelidir. Ana amacı gemi ve uçakların koordinatlarının belirlenmesi olan ve John Hopkins Uygulamalı Fizik Laboratuvarı tarafından geliştirilen bu sistem, yeryüzünden yaklaşık 1100 km uzaklıkta yaklaşık dairesel yörünge üzerinde hareket 7 uydudan oluşmaktadır. 1964 yılında devreye sokulan TRANSIT sistemi, uyduların zaman içinde yenilenmesiyle günümüzde de kullanılmaya devam etmektedir. Ancak bu sistemin iki önemli kusuru söz konusudur. Bir uydunun her 90 dakikada bir geçmesi nedeniyle, konum bilgisi enterpolasyonla bulunmak zorundadır. TRANSIT sisteminin ikinci büyük sorunu görece düşük navigasyon doğruluğudur (Hofmann-Wellenhof ve diğ., 1997). TRANSIT sisteminin bu dezavantajları nedeniyle, Zaman ve Uzunluk ile Navigasyon Sistemi (Navigation System with Time and Ranging - NAVSTAR) olarak da bilinen bir uzay bazlı radyo navigasyon sistemi olan GPS, 1973 yılında bir askeri güç geliştirme sistemi olarak devreye sokuldu. 1960'lı yılların ortalarında gerçekleştirilen önemli iki ayrı geliştirme programı da, GPS'nin kurulması sürecine katkıda bulundu. Bu programlar Donanma Araştırma Laboratuvarı'nın gerçekleştirdiği *Timation* ve Hava Kuvvetleri Uzay ve Füze Kurumu'nun *Program 621B* adlı programıdır. GPS tarihine ilişkin daha ayrıntılı bilgiler Parkinson (1996) ya da Wiederholt ve Kaplan (1996) tarafından verilmektedir.

GPS sistemi dünya genelinde her türlü hava koşulunda, bilinen bir referans sisteminde gerçek zamanlı, güvenilir ve doğruluğu yüksek konum belirleme, navigasyon ve zaman bilgisi sağlar. 7 uydudan oluşan TRANSIT sisteminin tersine, GPS sürekli olarak konum belirleme kapasitesine sahiptir. Nokta konumlarının

belirlenmesi için en az dört uydudan alınmış radyo sinyallerinin geçiş zamanı ölçüsüne gereksinim duyulur. Bu gereklilik nedeniyle, sistem dünyanın her yerinde en az dört uyduya gözlem yapılmasına olanak verecek şekilde tasarlanmıştır.

2.2 Sistem Bileşenleri

GPS sistemi üç ana bileşenden oluşmaktadır: uydu, kontrol ve kullanıcı bölümleri. Uydu bölümü sinyal yayımlayan uydulardan oluşur. Kontrol bölümü sistemi denetleyen yeryüzündeki tesislerdir. Kullanıcı bölümü ise bir bütün olarak kullanılan GPS alıcılarının tamamıdır.



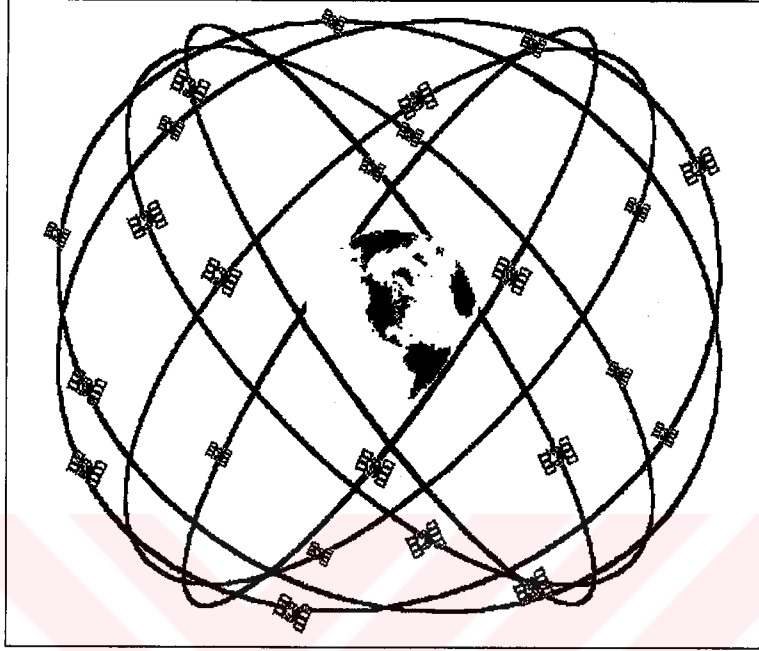
Şekil 2.1: GPS sistem bileşenleri

Şekil 2.1, GPS sistem bileşenlerini göstermektedir. Kontrol ve uzay bölümlerinin işletimi tümüyle ABD Hava Kuvvetleri Uzay Kumandası, İkinci Uzay Kanadı, Falcon Hava Kuvvetleri Üssü Uydu Kontrol Filosu'nun sorumluluğundadır (Rizos, 1997).

2.2.1 Uzay bölümü

GPS sistemi, ekvator düzlemine 55°'lik eğim açısına sahip 12 saatlik 6 dairesel yörünge üzerinde hareket eden 24 kullanılmaya hazır uydudan oluşmaktadır. GPS uyduları ve dağılımları Şekil 2.2'de verilmektedir. Uydular yeryüzünden yaklaşık

20200 km yükseklikteki yörüngeleri üzerinde hareket etmektedir. Daha önce de vurgulandığı gibi, aynı yörünge üzerindeki uyduların birbirlerinden uzaklıkları en az dört uydunun yeryüzünün her yerinden izlenebilir olması şartını sağlayacak şekilde ayarlanmıştır (Hofmann-Wellenhof ve diğ., 1997).



Şekil 2.2: GPS uydu dağılımı

GPS uyduları 5 gruptan oluşmaktadır: Blok I, II, IIA, IIR ve IIF. Uydu araç numaraları (Satellite Vehicle Number - SVN) 1'den 11'e kadar olan uydular Blok I uyduları olarak adlandırılır. Bu uydular 1978 yılından 1985 yılına kadar geliştirme uyduları olarak yörüngeye yerleştirilmiştir. Blok I uydularının ömrü 5 yıl olarak tasarlanmıştır, ancak atılan uyduların çoğunluğu 5 yıldan daha uzun bir süre çalıştılar. Bu erken dönem GPS uyduları, daha sonra atılan uyduların 55° 'lik açılarının tersine, ekvator düzlemine göre 63° 'lik eğim açısına sahipti. Blok I uyduları artık hizmet vermemektedir. SVN 13 ile SVN 21 arasındaki Blok II uyduları, kontrol bölümü ile iletişimsizlik durumunda 14 günlük bir zaman diliminde kademeli olarak servisi durdurabilme kapasitesine sahip ilk tam donanımlı uydulardır. Bu uydular Şubat 1989 –Ekim 1990 tarihleri arasında fırlatılmışlardır. Kullanımda olan üçüncü seri GPS uyduları, SVN numaraları 22 ile 40 arasında olan ve Kasım 1990 – Kasım 1997 tarihleri arasında fırlatılan Blok IIA uydularıdır. Bu uydular, eklenen bir özerk moment yönetim kapasitesi sayesinde yer bağlantısı olmaksızın 180 günlük bir zaman diliminde servis sağlayabilmektedir. Blok II ve IIA uydularının tasarlanan

ömürleri 7.3 yıldır. SVN numaraları 41 ile 62 arasında olan Blok IIR uyduları, kontrol bölümünün devre dışı kalması durumunda en az 14 gün servis sağlayacak şekilde tasarlanmış uydulardır. Blok IIR uyduları arasındaki iletişim ve uzunluk belirleme için kullanılan teknik, yer ile bağlantı sağlanamadığında uydunun 180 güne dek servis sağlamasını mümkün kılan özerk navigasyon kapasitesinin kullanımı sağlamaktadır. Ocak 1997'den itibaren yörüngeye yerleştirilmeye başlanan Blok IIR uydularının tasarlanan ömürleri 7.8 yıldır (USNO, 2001). Blok IIF uyduları yeni nesil uydular olarak geliştirilme aşamasındadır. Bu uyduların, yeni sivil frekansların kullanımı gibi diğer bazı gelişkin işlevlere sahip olması beklenmektedir (Ray, 2000). Şu anda, 4 Blok II, 18 Blok IIA ve 6 Blok IIR uydusundan oluşmak üzere 29 GPS uydusu servis sağlamaktadır. (USNO, 2002). Aparicio ve diğ. (1996) GPS uzay bölümünün mevcut durumu ve geleceği hakkında kapsamlı bilgi vermektedir.

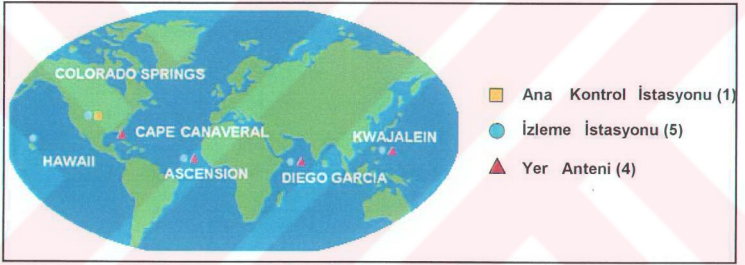
Her uydu, mikrodalga radyo frekansına merkezlenmiş iki modüle edilmiş sinyal yaymaktadır. Bu kanallar L bandı olarak adlandırılan bir frekans bandında yer almaktadır. Bunlar $L_1=1.57542$ GHz ve $L_2=1.22760$ GHz frekanslarıdır (Langley, 1990). Sinyaller navigasyon verilerini taşırlar. Bu veriler GPS sistemindeki diğer uyduların yaklaşık konumlarını veren almanak değerleri, sinyali yayımlayan uydunun hassas konum bilgilerini içeren uydu efemerisleri, uydu saat zamanı ve bazı iyonosferik verilerden oluşur. Sinyal yayımlayan uydudaki zaman, kullanıcılara aktarılan GPS sinyallerini yaratmak için kullanılan merkezi radyo frekansını kontrol etmek için kullanılır.

2.2.2 Kontrol bölümü

Operasyonel Kontrol Bölümü (Operational Control Segment - OCS), uydu arızalarının izlenmesi, telemetri, izleme, komut ve kontrol, efemeris hesaplamaları ve uydularla bağlantıyı sağlamak için gereksinim duyulan birimlerden oluşur. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, OCS kapsamında Hawaii, Colorado Springs, Ascension Adası, Diego Garcia ve Kwajalein'de kurulmuş beş izleme istasyonu bulunmaktadır.

Kontrol bölümü bileşenleri aşağıdaki işlevleri yerine getirir (Rizos, 1997):

- Beş istasyonun tümü izleme istasyonlarıdır ve işlevleri uyduları izlemek ve izleme verilerini MCS'ye (Master Control Station – Ana Kontrol İstasyonu) göndermektir.
- Colorado Springs'te bulunan Falcon Hava Kuvvetleri Üssü'nde bulunan MCS'de uydu efemerisleri ile uydu saat düzeltmelerinin hesaplanması amacıyla izleme verileri değerlendirilir. Bu istasyon ayrıca, uydu manevraları, sinyal şifreleme vb operasyonların yürütüldüğü birimdir.
- ABD'de bulunan diğer iki antenle birlikte bu istasyonların üçü (Ascension Adası, Diego Garcia ve Kwajalein) uydularla veri aktarımı için bağlantıyı sağlayarak veri yükleme işlevini yerine getirir. Bu veriler efemeris, navigasyon mesajı içerisinde yayımlanan saat düzeltme bilgisi ve MCS'den telemetri komutu gibi bilgileri içerir.



Şekil 2.3: GPS kontrol bölümü

2.2.3 Kullanıcı Bölümü

GPS kullanıcı bölümü GPS uyduları tarafından gönderilen sinyalleri toplayan GPS alıcılarından oluşur. Alıcıların birincil görevleri uzunluk ve uzunluk oranının ölçülmesi ile navigasyon verisinin demodülasyonunun gerçekleştirilmesidir (Braasch, 1999). Bu görevler, çeşitli GPS servisleri tarafından tanımlanan doğrulukta konum, hız ve zaman bilgilerinin sağlanması için gerçekleştirilir. GPS alıcısı ile ölçülen değer, uydudan gönderilen sinyal alıcıya ulaşması süresince geçen görünen zaman değeridir. Atmosferik gecikme hatası ve alıcı saat hatasını içeren bu zaman değeri pseudorange olarak adlandırılır. En az dört uyduya yapılan ölçülerin ve hesaplanan efemeris verilerinden elde edilen uydu konumunun kullanılmasıyla, dört bilinmeyen parametre belirlenir. Bilinen pseudorange ölçülerinden elde edilen bu

parametreler alıcının kurulduğu noktanın üç boyutlu koordinatları ve alıcı saat hatasıdır. Pseudorange aşağıda verilen lineer olmayan eşitlik ile ifade edilir:

$$r_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} + c d_T \quad (2.1)$$

Burada,

r	pseudorange (m),
i	uydu indeksi,
x_i, y_i, z_i	i uydusunun koordinatları (m),
x_u, y_u, z_u	kullanıcı koordinatları (m),
c	ışık hızı (m/s),
d_T	alıcı saat hatası (s).

2.1 eşitliğinin bazı başlangıç değerlerine göre lineerleştirilmesi ve en küçük kareler ya da Kalman filtreleme algoritmalarının kullanılmasıyla, kullanıcı konumu ve alıcı saat hatası hesaplanabilir. Uygulamada çoğu kez, dörtten daha fazla uydudan zaman ölçmesi elde edilebilmektedir. Gerekenden fazla ölçü ile çözüme ulaşılan bu durumda, fazla ölçüler çözüm doğruluğunu iyileştirmektedir. Alıcının hız ve saat sürüklenmesi, benzer eşzamanlı ölçülere ait eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir (Ray, 2000).

GPS kullanıcı bölümü, askeri ve sivil kullanıcılar olmak üzere iki ana gruptan oluşur. Kullanıcıların yararlandıkları hizmetler ise Standart Konum Belirleme Hizmeti (Standard Positioning Service – SPS) ve Presizyonlu Konum Belirleme Hizmeti (Precise Positioning Service - PPS) olarak iki ayrı grupta sınıflandırılmaktadır. SPS ile sivil, ticari ya da bilimsel amaçlarla GPS sistemini kullananlara sürekli olarak dünya genelinde ücretsiz olarak hizmet verilmektedir. Günümüzde sivil uygulamalarda SPS ile sadece L_1 frekansındaki, coarse/acquisition ya da açık/erişim (C/A) olarak adlandırılan sinyal tamamen erişilebilir durumdadır (Shaw ve diğ., 2000). ABD Savunma Dairesi'nden (US Department of Defense – DOD) onay alınmaksızın erişilebilen SPS, PPS'ye göre görece daha düşük doğruluk sağlamaktadır. 1 Mayıs 2000 tarihine dek, SPS ile elde edilen doğruluk kasti olarak

düşürülmekteydi. Bu tarihte, Selective Availability (SA) olarak adlandırılan bu uygulamaya son verilmiştir.

Sivil kullanıcılar açısından elde edilen doğruluğu sınırlayan bazı etmenler varlığını korusa da, en az iki noktada eş zamanlı ölçmeler yapılarak uygulanan diferansiyel teknikler oldukça iyi bağıl konum doğruluğu sağlamaktadır. Diferansiyel kod ve taşıyıcı faz konum belirleme yöntemleri ile elde edilen bağıl konum doğrulukları sırasıyla bir metre ve bir santimetreden daha iyidir.

SPS'den daha presizyonlu konum doğruluğu sağlayan PPS ise yalnızca askeri kullanıcıların ve DOD'den izin alan sivil kullanıcıların erişimine açıktır ve diferansiyel tekniklerin kullanılmaması durumunda bile oldukça doğru konum, hız ve zaman bilgisi sağlamaktadır. SA etkisinin kaldırılmasından bu yana SPS ile kullanıcılar 10 metrenin altında yatay konum doğruluğu elde edebilmektedirler (Shaw ve diğ., 2000). NAVSTAR GPS (1995) tarafından yapılan sinyal tanımlamalarına göre, %95 olasılıkla SPS ile elde edilen tahmini yatay konum doğruluğu 22 m, düşey konum doğruluğu 33 m ve zaman doğruluğu ise uluslararası zaman standardı olan UTC'ye (Universal Time Coordinated) bağlı olarak 200 nanosaniyedir.

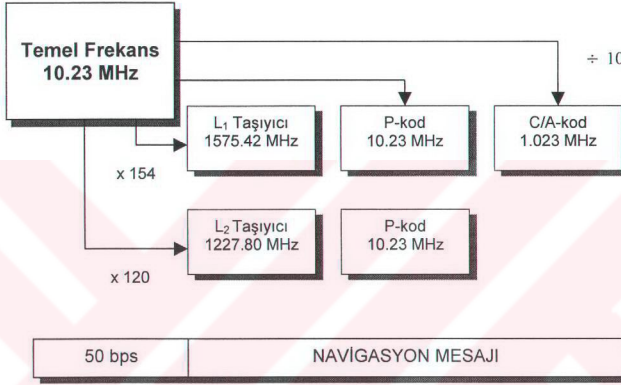
Daha önce de vurgulandığı gibi, GPS başlangıçta askeri uygulamalar için geliştirilmişti. Ancak günümüzde milyonlarca sivil tarafından kullanılmaktadır. GPS'nin uygulama alanları, deniz, kara ve hava taşıtlarının navigasyonu, hidrografik ölçmeler, atmosferdeki su buharı miktarının belirlenmesi, jeodezik ölçmeler, presizyonlu zaman transferi, iyonosferik araştırmalar, uzay araçlarının yörüngelerinin belirlenmesi ve yürüyüş, balıkçılık ve avcılık benzeri aktiviteler gibi geniş bir spektruma yayılmıştır.

2.3 GPS Sinyal Yapısı

GPS, presizyonlu uzunluk elde edilebilmesi için geniş spektrumlu sinyaller kullanır. Bunu gerçekleştirmek için, GPS sinyal frekansları iyonosferik gecikme hatalarını göreceli olarak azaltacak, bant genişliği payını iyileştirecek ve daha az alan kaybı ve

global iletim için bant genişliğinin sağlanabilirliğini mümkün kılacak şekilde seçilmiştir (Spilker, 1996a).

L bandı taşıyıcı dalgaları, alıcıya uydusu saat okumalarını temin etmek ve yörünge parametreleri ve iyonosfer bilgileri gibi verileri yayımlamak için, kodlarla modüle edilmiştir. Bir bütün olarak GPS sinyal bileşenleri Şekil 2.4'te gösterilmektedir. L₁ hem 10.23 MHz saat oran presizyonundaki P kod, hem de 1.023 MHz sivil C/A kod ile modüle edilmiştir.



Şekil 2.4: GPS sinyal bileşenleri

P ve C/A kodları +/-1 uzunluk belirleme (ranging) sinyalleridir. Navigasyon veri bitleri +/-1 şeklindedir ve 50 bit/saniye (bit per second – bps) frekansına sahiptir. Böylece t zamanında i uydusundan yayımlanan L₁ sinyali aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Spilker, 1996a):

$$L_1(t) = A_P X_P(t) D_i(t) \cos(\omega_1 t + \Phi_1) + A_C X_C(t) D_i(t) \sin(\omega_1 t + \Phi_1) \quad (2.2)$$

Burada,

A_P, A_C P-kod ve C/A kod genlikleri (volt)

X_P, X_C P-kod ve C/A kod

D navigasyon veri akışı

ω_1 L₁ frekansı (rad/s), ve

Φ_1 küçük faz noise ve osilatör sürüklenme bileşeni (rad).

L_2 sinyali yer komutasının seçimiyle hem P-kod ve hem C/A kod ile iki fazlı modüle edilmiştir. L_2 üzerindeki P-kod eşitliği aşağıda verilmektedir:

$$L_{2i} = B_p X_{p_i}(t) D_i(t) \cos(\omega_2 t + \Phi_2) \quad (2.3)$$

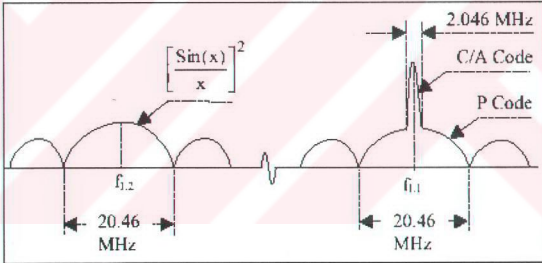
burada,

B_p L_2 sinyal genliği (volt),

ω_2 L_2 frekansı (rad/s), ve

Φ_2 faz noise (rad).

Şekil 2.5'te GPS sinyalinin kuvvet spektral yoğunluğu (Power Spectral Density – PSD) gösterilmektedir. Anti-spoofing aktif hale geldiğinde P-kod, şifrelenmiş Y kodunun yerini alır. P, Y ve C/A kodlarına ilişkin ayrıntılar ve diğer sinyal tanımlamaları Spilker (1996a) tarafından verilmektedir.



Şekil 2.5: GPS sinyali kuvvet spektral yoğunluğu (Spilker, 1996a)

Uydu saat okumaları için kullanılan her iki kod da, geniş spektrum iletişimi için uygun bir bant genişliğinde sinyal yayan bir pseudorandom noise (PRN) serisi ile karakterize edilir. Böylece daha fazla iletişim güvenliği sağlanmış olur (Hofmann-Wellenhof ve diğ., 1997). Alıcıda PRN serisi türetilir ve daha sonra tüm uydulardan alınan sinyallerle korelasyonu sağlanarak uzunluk ve uzunluk-oranı ölçmelerinin gerçekleştirilmesi amacıyla her bir uydunun ayrı ayrı teşhis edilmesi sağlanır (Ray, 2000).

2.4 GPS Ölçüleri

Kavramsal olarak GPS ölçmeleri, alınan ve alıcıda türetilen sinyallerin karşılaştırılmasına bağlı olarak, ölçülen zaman ve faz farklılıklarından elde edilen uzunluklardır (Hofmann-Wellenhof ve diğ., 1997). GPS sinyalleri üzerinde yapılabilecek iki ana ölçme türü kod ve taşıyıcı faz ölçmeleridir. Kod ölçmeleri PRN kodlarına dayalıdır ve bazen “kod uzunluk” ya da “kod faz” olarak da adlandırılabilir. Taşıyıcı faz ölçüleri kod ölçülerinden daha presizyonludur, ancak kodlara göre çok daha fazla belirsizlik (ambiguity) derecesine sahiptir. (Langley, 1993). Yüksek performanslı alıcıların bir çoğu hem kod, hem de taşıyıcı faz ölçüsü yapabilirler.

Bir alıcıdan yapılan uzunluk ölçüsü pseudorange olarak adlandırılır. “Pseudo” öneki hem alıcı hem de uydu saat hatalarından kaynaklanan saat hatasından ileri gelir. Uydu saat hataları, uydu mesajından elde edilebilen saat düzeltmelerinin kullanıldığı varsayımıyla 3 metreden daha azdır (Langley, 1997). Alıcı saat hataları, alıcı saatinin kalitesine bağlı olarak 10-100 metre arasında değişmektedir (Wells ve diğ., 1986). Saat hatalarının yanı sıra çeşitli küçük hata bileşenlerini içeren uzunluk ölçmesi aşağıdaki gibi verilebilir (Leick, 1995; Teunissen ve Kleusberg, 1998):

$$P = \rho + d_p + c(d_t - d_T) + d_{ion} + d_{trop} + d_e + \varepsilon_p + \varepsilon_{Mp} \quad (2.4)$$

Burada

P	ölçülen kod uzunluğu (m)
ρ	uydu ve alıcı anteni arasındaki geometrik uzunluk (m)
d_p	yörünge hatası (m)
c	vakum ortamında ışık hızı (m/s)
d_t	uydu saat hatası (s)
d_T	alıcı saat hatası (s)
d_{ion}	iyonosferik gecikme hatası (m)
d_{trop}	troposferik gecikme hatası (m)
d_e	uydu ve alıcı donanım noise değeri (m)
ε_p	alıcı kod noise değeri (m)
ε_{Mp}	kod multipath hatası (m).

Taşıyıcı faz, alınan uydusu taşıyıcısının GPS alıcısında yaratılan sabit frekanslı bir sinyalle karşılaştırılması yoluyla ölçülür. (Hofmann-Wellenhof ve diğ., 1997). Taşıyıcı faz ölçmeleri için, tamsayı çevrim belirsizliğine dikkat edilmelidir. Bir alıcı, taşıyıcı faz vuruşunun yalnızca ondalık bölümünü ölçebildiği için, her faz ölçmesindeki dalga boylarının tamsayısı bilinemez. Bu nedenle bilinmeyen tamsayı sayısı tamsayı çevrim belirsizliği olarak adlandırılır. Tamsayı çevrim belirsizlik değerleri alıcılar veya farklı uydular arasındaki ölçmeler için bağımsızdır. Ancak faz sıçraması gerçekleşmediği sürece, belirsizlik değerleri farklı epoklarda yapılan ardışık ölçmeler için sabittir. Başlangıç tamsayı çevrim belirsizliği güvenilir olarak çözüldükten sonra taşıyıcı faz ölçmesi diferansiyel modda oldukça presizyonlu konum sağlayacaktır. Bir alıcıdan yapılan taşıyıcı faz ölçmesi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilebilir (Leick, 1995; Teunissen ve Kleusberg, 1998):

$$\Phi = \rho + d\rho + c(d_t - d_r) + \lambda N - d_{ion_1} + d_{trop} + d_e + \varepsilon_\phi + \varepsilon_{M_\phi} \quad (2.5)$$

Burada

Φ	ölçülen taşıyıcı faz (m)
λ	taşıyıcı dalga boyu (m)
N	tamsayı çevrim belirsizliği (çevrim)
ε_ϕ	alıcı taşıyıcı noise değeri, ve
ε_{M_ϕ}	taşıyıcı faz multipath hatası (m).

2.5 eşitliğini ilgili uzunluk ölçme eşitliği ile karşılaştırdığımızda şu sonuçlara ulaşırız:

- Her ikisi de, geometrik uzunluk, yörünge hatası, saat hataları ve troposferik gecikme hatasını içerir.
- Taşıyıcı faz ölçmeleri tamsayı çevrim belirsizliğini ifade eden ek bir parametre içerir.
- İki eşitlikteki iyonosferik gecikme hatası ters işaretlidir.
- Uzunluk ölçmelerindeki kod multipath hatasının yerini taşıyıcı multipath hatası almıştır.

- e) Uzunluk ölçmesindeki kod noise değerinin yerini taşıyıcı faz ölçmesi noise değeri almıştır.

Bunun yanında eşitlikler arasında bir fark daha vardır. Toplam sinyal yol alma süresi, iyonosferik etki ve donanım gecikmesindeki farklılıklar nedeniyle kod ve taşıyıcı faz ölçmeleri için bir parça farklıdır. Uydu koordinatlarının değerlendirilmesinde zaman argümanı da bir parça farklıdır (Teunissen ve Kleusberg, 1998).

Taşıyıcı dalga boyları (L_1 için 19 cm) C/A kod çip uzunluğundan (293 m) çok daha kısadır ve sonuç olarak daha doğru olarak ölçülebilir ve kod ölçülerine göre çok daha yüksek konum doğruluğu sağlamak için kullanılabilirler. Doğrusu, kod ölçmeleri kullanarak elde edilebilen en iyi bağıl konum doğruluğu genellikle bir kaç metredir. Taşıyıcı faz ölçülerinin kullanılmasıyla elde edilen en iyi doğruluk ise bir kaç santimetre dolayındadır. Daha önce de vurgulandığı gibi, taşıyıcı faz ölçmeleriyle konum belirlemede söz konusu olan temel problem kod ölçmelerinde varolmayan tamsayı çevrim belirsizliğidir (NRC, 1995).

2.5 GPS İle Konum Belirleme

GPS sisteminde nokta koordinatları, iyi tanımlanmış bir koordinat sistemi olan WGS84 sisteminde karakterize edilirler (NIMA, 2000). İzleme istasyonlarında uydu koordinatları WGS84 sisteminde belirlenir ve uydular üzerinden kullanıcılara ulaştırılır. Kullanıcı konumunun belirlenmesi için uydu koordinatlarına gereksinim duyulduğu için, bu değerlerdeki hatalar doğrudan konum belirleme kalitesini etkilerler (Rizos, 1997). GPS tekniğinin kullanılmasıyla nokta konumları mutlak ya da bağıl olmak üzere iki yolla belirlenir.

Bir noktanın koordinatlarının bu noktada kurulan bir alıcı ile belirlendiği mod mutlak konum belirleme olarak adlandırılır. Bu konum belirleme türü tek nokta konum belirlemesi (single point positioning), tek alıcılı konum belirleme (single receiver positioning) ya da navigasyon çözümü (navigation solution) olarak da adlandırılır. Mutlak konum belirleme bağıl konum belirlemeye göre daha düşük doğruluk sağlar.

Diferansiyel konum belirleme olarak da adlandırılan bağıl konum belirlemede, alıcı mutlak koordinatları bilinen bir A noktası üzerine kurulur ve konumu belirlenecek

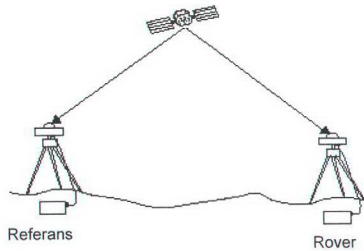
diğer B noktası üzerine bir başka alıcı kurulur. Her iki alıcıyla eşzamanlı ölçme yapılır, ve her iki noktada toplanan veriler A noktasına bağlı olarak B noktasının konumunun belirlenmesi için değerlendirilir. A noktasının koordinatları bilindiği için, B noktasının mutlak konumu basitçe A noktasının koordinatlarına baz kenarı bileşenlerinin eklenmesiyle elde edilir (Hofmann-Wellenhof ve diğ., 1997; Rizos, 1997). Mutlak konum belirleme yerine bağlı konum belirlemenin sağladığı avantaj, verilerin değerlendirilmesinde her iki noktada da birbirine yakın olan ölçme hatalarının çoğu elimine edildiği için çok daha yüksek bir doğruluk elde edilmesidir (NRC, 1995). Eşzamanlı ölçme yapan alıcıların kurulduğu noktalar arasındaki baz bileşenlerinin ölçüldüğü bağlı konum belirleme jeodezik çalışmalarda uygulanan standart ölçme modudur (Rizos, 1997). Bağlı konum belirleme kavramı ve belli başlı hata kaynakları bir sonraki bölümde ele alınacaktır.

3. BAĞIL KONUM BELİRLEME VE HATA KAYNAKLARI

Uzunluk ve taşıyıcı faz ölçmelerindeki bir çok hata kaynağı, aynı anda bir uyduyu izleyen alıcılar arasında korelasyonludur. Bu durum, hataların uyduya bağımlı olması ya da atmosferik yayılma gecikmesinden kaynaklanmaktadır. Bundan dolayı kısa bir bazın iki ucunda kurulu alıcılar açısından bu hatalar özdedir. Çoklukla iki alıcıdaki hatalar arasındaki korelasyon oranı baz kenarı uzunluğuna bağılıdır (Ray, 2000). Önceki bölümde de vurgulandığı gibi, GPS tekniği ile gerçekleştirilen jeodezik uygulamalarda, bir çok hatayı azaltmayı ya da elimine etmeyi olanaklı kılan bağıl konum belirleme yöntemi uygulanır. Bu yaklaşımda, ilk olarak iki alıcıdan bir uyduya yapılan ölçmelerin farkları alınır. Daha sonra ise, iki farklı uydü için hesaplanan farkların birbirlerinden olan farkları hesaplanır. Bu bölümde fark alma ya da bağıl konum belirleme yaklaşımı ve bu yöntemin uygulanması sonrasında varlığını koruyan başlıca hata kaynakları incelenecektir.

3.1 Tek Fark (Single Differencing)

Şekil 3.1’de gösterilen tek fark yaklaşımı, bağıl konum belirleme yönteminin ilk adımıdır. Bu yaklaşımda eşzamanlı olarak bir uyduyu izleyen iki alıcıda birbirleriyle korelasyonlu olan hatalar azaltılabilir.



Şekil 3.1: Alıcılar arasında fark

Bu, 2.4 ve 2.5 eşitliklerinde verilen kod ve faz ölçülerinin tek farklarının alınmasıyla gerçekleştirilir. Bu eşitlikler kullanılarak Şekil 3.1'de gösterilen bir uydu ve iki alıcı için farkları alınmış uzunluk ve faz ölçüleri aşağıdaki gibi oluşturulabilir:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{ab}^i &= P_b^i - P_a^i \\
 &= (\rho_b^i - \rho_a^i) + (d_{\rho_b}^i - d_{\rho_a}^i) + c(d_{T_b}^i - d_{T_a}^i) + (d_{ion_b}^i - d_{ion_a}^i) \\
 &+ (d_{trop_b}^i - d_{trop_a}^i) + (d_{e_b}^i - d_{e_a}^i) + (\varepsilon_{P_b}^i - \varepsilon_{P_a}^i) + (\varepsilon_{MP_b}^i - \varepsilon_{MP_a}^i) \\
 &= \Delta \rho_{ab}^i + \Delta d_{\rho_{ab}}^i + c \Delta d_{T_{ab}}^i + \Delta d_{ion_{ab}}^i + \Delta d_{trop_{ab}}^i + \Delta d_{e_{ab}}^i + \Delta \varepsilon_{P_{ab}}^i + \Delta \varepsilon_{MP_{ab}}^i
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta \Phi_{ab}^i &= \Phi_b^i - \Phi_a^i \\
 &= (\rho_b^i - \rho_a^i) + (d_{\rho_b}^i - d_{\rho_a}^i) + c(d_{T_b}^i - d_{T_a}^i) + \lambda(N_b^i - N_a^i) - (d_{ion_b}^i - d_{ion_a}^i) \\
 &+ (d_{trop_b}^i - d_{trop_a}^i) + (d_{e_b}^i - d_{e_a}^i) + (\varepsilon_{\phi_b}^i - \varepsilon_{\phi_a}^i) + (\varepsilon_{M\phi_b}^i - \varepsilon_{M\phi_a}^i) \\
 &= \Delta \Phi_{ab}^i + \Delta d_{\rho_{ab}}^i + c \Delta d_{T_{ab}}^i + \Delta d_{ion_{ab}}^i + \Delta d_{trop_{ab}}^i + \Delta d_{e_{ab}}^i + \Delta \varepsilon_{\phi_{ab}}^i + \Delta \varepsilon_{M\phi_{ab}}^i
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Yukarıdaki eşitliklerde i alt indisi i uydusuna, a ve b indisleri ise a ve b alıcılara karşılık gelmektedir. Δ terimi alıcılar arasında tek farkı ifade etmektedir. Bu eşitliklerden de görüldüğü gibi, uydu saat hatası terimi eşitliklerde yer almamaktadır. Bunun nedeni uydu saat hatasının eşzamanlı ölçme yapan alıcılar için hemen hemen aynı değerde olmasıdır. Gerçekte, uydu saat hataları farklı iletim süreleri nedeniyle tamamen ortadan kalkmayabilirler. Uydu sinyallerinin geçiş süreleri, uydu ve alıcılar arasındaki uzunlukların birbirlerinden farklı olmaları nedeniyle eşit değildir. Örneğin bu fark, 300 km uzunluğundaki bir baz için 1 milisaniyeye dek çıkabilmektedir. Bununla beraber, uydular hassas atomik osilatörler kullandıkları için, uydu saat hatalarının özdeş olduğunun varsayılması olağandır ve böylece alıcılar arasında farklar oluşturulduğunda ortadan kalkarlar (Rizos, 1997).

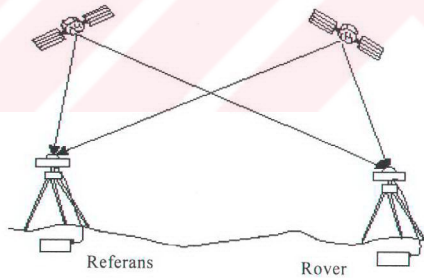
Tek fark alma sonrasında diğer hata kaynakları varlıklarını korurlar. Fark eşitliğindeki hatanın ortadan kalkmasıyla, iki alıcıdaki hatalar arasında yüksek dereceli bir korelasyon ortaya çıkar. Özellikle kısa baz kenarları için iyonosferik ve troposferik gecikme hataları yüksek derecede korelasyonludur ve böylece artık hataların çok küçük oldukları varsayılabilir. Tamamen alıcıya bağımlı olan donanım hatası, her iki alıcının da aynı tür olması ve aynı firma tarafından üretilmeleri

durumunda ihmal edilebilir. Geriye kalan hatalar, yani alıcı saat hatası, tamsayı çevrim belirsizliği, alıcı noise değeri ve multipath etkisi ortadan kalkmaz. Alıcıların giderek artan kalitesi ve tamsayı çevrim belirsizliği çözüm tekniğindeki gelişmeler gözönünde bulundurulduğunda tek fark ölçmelerinde en belirgin hata kaynağının multipath olduğu görülmektedir. Uzun kenarlı bazlarda uydu yörünge hataları ile iyonosferik ve troposferik gecikme hataları da anlamlı hale gelirler.

Tek fark alma yönteminde, a ve b alıcılarından bir uyduya olan uzaklıklar belirlenir. Eğer uydu konumu ve alıcılardan birinin konumu biliniyorsa, diğer alıcının konumu belirlenebilir. Bu kavram, bağıl ya da diferansiyel konum belirlemedir (Ray, 2000).

3.2 Çift Fark (Double Differencing)

Çift fark terimi uydular arasında ve alıcılar arasındaki farkların hesaplanmasıyla oluşturulmuş ölçüye karşılık gelir. Bu iki alıcıdan tek uyduya hesaplanan farkların hesaplanması ve hemen ardından iki uyduya olan fark değerlerinin farkının alınmasıyla gerçekleştirilir. Şekil 3.2’de çift fark gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Çift fark

3.1 ve 3.2 eşitliklerinin yardımıyla uzunluk ve taşıyıcı faz ölçmeleri için çift fark eşitlikleri aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$\begin{aligned}
\Delta \nabla P_{ab}^{ij} &= \Delta P_{ab}^j - \Delta P_{ab}^i \\
&= [(\rho_b^j - \rho_b^i) - (\rho_a^j - \rho_a^i)] + [(d_{\rho_b}^j - d_{\rho_b}^i) - (d_{\rho_a}^j - d_{\rho_a}^i)] \\
&+ [(d_{ion_b}^j - d_{ion_b}^i) - (d_{ion_a}^j - d_{ion_a}^i)] + [(d_{trop_b}^j - d_{trop_b}^i) - (d_{trop_a}^j - d_{trop_a}^i)] \\
&+ [(\varepsilon_{P_b}^j - \varepsilon_{P_b}^i) - (\varepsilon_{P_a}^j - \varepsilon_{P_a}^i)] + [(\varepsilon_{MP_b}^j - \varepsilon_{MP_b}^i) - (\varepsilon_{MP_a}^j - \varepsilon_{MP_a}^i)] \\
&= \Delta \nabla \rho_{ab}^{ij} + \Delta \nabla d_{\rho_{ab}}^{ij} + \Delta \nabla d_{ion_{ab}}^{ij} + \Delta \nabla d_{trop_{ab}}^{ij} + \Delta \nabla \varepsilon_{P_{ab}}^{ij} + \Delta \nabla \varepsilon_{MP_{ab}}^{ij}
\end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned}
\Delta \nabla \Phi_{ab}^{ij} &= \Delta \Phi_{ab}^j - \Delta \Phi_{ab}^i \\
&= [(\rho_b^j - \rho_b^i) - (\rho_a^j - \rho_a^i)] + [(d_{\rho_b}^j - d_{\rho_b}^i) - (d_{\rho_a}^j - d_{\rho_a}^i)] \\
&+ \lambda [(N_b^j - N_b^i) - (N_a^j - N_a^i)] - [(d_{ion_b}^j - d_{ion_b}^i) - (d_{ion_a}^j - d_{ion_a}^i)] \\
&+ [(d_{trop_b}^j - d_{trop_b}^i) - (d_{trop_a}^j - d_{trop_a}^i)] + [(\varepsilon_{\Phi_b}^j - \varepsilon_{\Phi_b}^i) - (\varepsilon_{\Phi_a}^j - \varepsilon_{\Phi_a}^i)] \\
&+ [(\varepsilon_{M\Phi_b}^j - \varepsilon_{M\Phi_b}^i) - (\varepsilon_{M\Phi_a}^j - \varepsilon_{M\Phi_a}^i)] \\
&= \Delta \nabla \rho_{ab}^{ij} + \Delta \nabla d_{\rho_{ab}}^{ij} + \lambda \Delta \nabla N_{ab}^{ij} - \Delta \nabla d_{ion_{ab}}^{ij} + \Delta \nabla d_{trop_{ab}}^{ij} + \Delta \nabla \varepsilon_{\Phi_{ab}}^{ij} + \Delta \nabla \varepsilon_{M\Phi_{ab}}^{ij}
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Yukarıdaki eşitliklerde kullanılan ∇ , uydular arasındaki tek farkı ifade etmektedir. Eşitliklerden görüleceği gibi alıcı saat hatası ve uydular gecikme terimleri elimine olmuştur. Bu da, her iki istasyondaki ölçmelerin eş zamanlı olarak yapılması ve uydular sinyallerinin aynı anda yayılması şeklindeki varsayımdan kaynaklanmaktadır. Tek farkta olduğu gibi, multipath en önemli hata kaynağıdır. Bununla beraber, yine tek fark ölçülerinde olduğu gibi, uzun mesafeli bazlarda uydular yörünge hatası ile iyonosferik ve troposferik gecikme hataları anlamlı hale gelmektedir. Ayrıca, çift farklardaki alıcı noise hatası tek farktatının iki katıdır.

3.3 GPS'de Hata Kaynakları

1 santimetrenin altında ya da milimetre düzeyinde presizyona ulaşmak için, GPS ölçülerinin analiz edilmesi ve hataların azaltılması ya da elimine edilmesi gereklidir. Önceki bölümde vurgulandığı gibi, fark almadan sonra geriye kalan hata kaynakları uydular yörünge hataları, iyonosferik ve troposferik gecikme, alıcının noise değeri ve multipath etkisidir. Taşıyıcı faz belirsizliğinin, tam dalga boyu sayısının doğru bir şekilde hesaplanmasıyla çözüldüğü varsayılabilir. GPS hatalarının büyüklükleri Tablo 3.1'de verilmektedir.

Bu bölümde, bağıl konum belirlemedeki vurgulanan başlıca hata kaynakları kısaca ele alınmaktadır. GPS hatalarına ilişkin daha fazla bilgi Wells ve diğ. (1986), Parkinson (1996b), Langley (1997a) ya da Rizos (1997) tarafından verilmektedir. Troposferik gecikme konusu ayrıntılı olarak bir sonraki bölümde incelenecektir.

Tablo 3.1: GPS hata büyüklükleri

Hata	Büyükük
Uydu saati	10 m (broadcast düzeltmeleri ile)
Alıcı saati	10 - 100 m (alıcı osilatörünün türüne bağlı olarak)
Yörünge	5 - 25 m
İyonosferik	50 m (zenit doğrultusunda)
Troposferik	2 m (zenit doğrultusunda)
Multipath	
C/A kod	50 cm - 20 m (GPS donanımı ve konuma bağlı)
Taşıyıcı faz	Bir kaç cm (GPS donanımı ve konuma bağlı)
Alıcı noise değeri	
C/A kod	10 cm ile to 2-3 m arası (alıcı türüne bağlı)
Taşıyıcı faz	0.5 - 5 mm (alıcı türüne bağlı)

3.3.1 Uydu yörünge hataları

Alıcı konumunun belirlenebilmesi için uydu konumunun bilinmesi gereklidir. Operasyonel Kontrol Bölümü uydu navigasyon mesajları üzerinde uydu konum bilgilerini yayınlar. Ana Kontrol İstasyonu izleme istasyonları tarafından elde edilen pseudorange ve taşıyıcı faz verilerini toplar ve uyduların gelecekteki yörüngelerini önceden tahmin eder. Sonrasında elde edilen ve efemeris olarak adlandırılan uydu yörünge bilgileri ilgili uyduya aktarılır. Uydu da, bu bilgileri navigasyon mesajı

içerisinde yayınlar (Langley, 1997a). Uydu konumları bir konum kestirimini yansıttıkları için, konum presizyonu son yörünge bilgisi aktarımı sonrasında bir sonraki aktarıma dek azalma eğilimine girer (Parkinson, 1996b).

Bir uydunun konumunun tam olarak belirlenebilmesi olası olmadığı için, efemeris bilgileri ilgili bazı hata kaynaklarını barındırıyor olacaktır. Yörünge hatası olarak adlandırılan bu hata broadcast efemeris bilgileri kullanılarak hesaplanan uydu konumu ile uydunun uzaydaki “gerçek” konumu arasındaki farka eşittir. Yörünge hataları SA uygulaması kaldırılmadan önce 100 metre dolayındaydı. Ancak, yapay SA'nın uygulanmadığı günümüzde yörünge hataları 5-25 metre arasında değişmektedir (NRC, 1995). Uydu saatleri ile yüksek bir korelasyona sahip olan uydu yörünge hataları, hem P kod, hem de C/A kod için aynı değere sahiptir (Parkinson, 1996b).

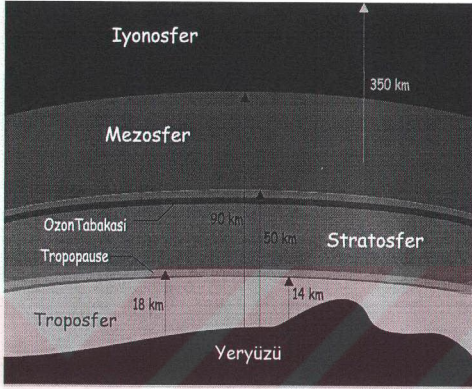
3.3.2 İyonosferik gecikme

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, iyonosfer, atmosferin 50–1000 km arasındaki üst kesiminde yer almaktadır (Langley, 1992). İyonosfer birincil olarak güneşe ve güneşin aktivitesine bağlı olarak zayıf bir şekilde iyonize olmuş bir plazmadır ve radyo dalgalarının yayılmasını çeşitli yollarla etkilemektedir. Bu nedenle, GPS kullanıcılarının yaptığı yüksek doğruluk gerektiren ölçmelerde, uzunluk belirlenmesi üzerindeki etkisi ile önemli bir hata kaynağı olmaktadır (Klobuchar, 1996).

Herhangi bir ortamda taşıyıcı dalganın yayılma hızı, havasız bir ortamdakinden ya daha düşük ya da daha fazladır. İyonosferden geçen GPS sinyalleri de havasız ortamdaki ışık hızıyla yayılmazlar. Bunun nedeni iyonosferdeki serbest elektronlardır. Sinyalin iyonosferde yol alması sırasında gerçekleşen gecikme, iyonosferdeki toplam serbest elektron miktarı (Total Electron Content – TEC) ile orantılıdır. Gecikme, aynı zamanda taşıyıcı frekansının karesinin tersi ile orantılıdır (Parkinson, 1996b).

İyonosfer radyo dalgaları için dağıtıcı (dispersive) bir ortamdır. Bunun anlamı kırılma indisinin dalga frekansının bir fonksiyonu olmasıdır. Serbest elektron yoğunluğu ve dalga frekansına ek olarak, iyonosferik gecikmeyi etkileyen bir diğer etmense yeryüzü manyetik alan yoğunluğudur. GPS sinyal yolu boyunca faz ve grup

kırılma indislerinin entegrasyonu, iyonosferik gecikme hatasından etkilenen alıcı ve uydu arasındaki mesafeye ilişkin bir ölçüt ortaya koyar. Önceki bölümde vurgulandığı gibi iyonosferik gecikme değeri, taşıyıcı fazlar için negatif, uzunluk ölçülerinde ise pozitif değerdedir (Langley, 1997a).



Şekil 3.3: Atmosferin yapısı

TEC hem zamana hem de bulunulan yere bağlı olarak yüksek oranda değişken bir karakter taşır. Bulunulan yere bağlı olarak gerçekleşen değişim miktarlarının frekansı çoklukla düşüktür ve bunlar da genellikle tropik, orta enlem ve kutup bölgeleri gibi çeşitli iyonosferik enlem kuşaklarına denk düşerler. Zamana bağlı değişimlerin frekansı ise yüksek (pırlıltı -scintillation- etkisi), orta büyüklükte (günlük ve mevsimsel etkiler) ve düşük (11 yıl süren güneşin çevrimi) olabilir. (Rizos, 1997). İyonosferin yapısı ve içerisindeki zirve yoğunlukları zaman içerisinde büyük oranda değişebilir. Bu değişim ayrıca, güneşle ilişkili solar ya da elektromanyetik fırtınalar gibi belli etmenlere de bağlıdır (Langley, 1997a; Klobuchar, 1996). İyonosfer ıllan kuşaklarda daha stabildir, ancak ekvator bölgesinde ya da manyetik kutup yakınlarında önemli oranda değişim gösterebilir (Parkinson, 1996b).

İyonosferin dağıtıcı doğası nedeniyle, çift frekanslı konum belirleme sistemlerinin kullanımı iyonosferik hataların büyük oranda üstesinden gelinebilmesini mümkün kılar. Bu durumda oluşturulan L_1 ve L_2 pseudorange ölçmelerinin lineer kombinasyonu, L_1 frekansındaki ölçmeleri etkileyen iyonosferik hataların kestirimini

ve nihayetinde ortadan kaldırılmasını mümkün kılar. L_1 frekansındaki iyonosferik uzunluğa etkileyen iyonosferik gecikme aşağıdaki gibi formüle edilir (Klobuchar, 1996):

$$d_{ion} = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (P_1 - P_2) \quad (3.5)$$

Burada

f_1, f_2 L_1 ve L_2 frekansları (Hz), ve

P_1, P_2 L_1 ve L_2 frekanslarında ölçülen kodlar.

Tek frekanslı ölçme yapılması durumunda iyonosferik gecikme etkisinin düzeltilmesi için alternatif bir yöntem geliştirilmelidir. Bu konudaki tipik yaklaşım gecikme etkisinin tahminini sağlayan ampirik bir modelin kullanılmasıdır. (Schaer ve diğ., 1995; Schaer ve diğ., 1998). Daha önce vurgulandığı gibi, iyonosferik hata etkisini azaltmak için kullanılan modelin düzeltme değerleri uydu navigasyon mesajı üzerinde kullanıcılara iletilir. Bu modellerin uygulanmasıyla iyonosferik gecikme hatası %50 ya da daha fazla oranda azaltulabilir (Langley, 1997a). İyonosferik hatalar zenit doğrultusunda, yani uydu eğim açısı 90° olduğunda 50 metre, uydu eğim açısının 0° olduğu ufuk çizgisinde ise 150 metredir (NRC, 1995).

3.3.3 Troposferik gecikme

Atmosferin alçak bölümleri olan stratosfer ve troposferi de içeren nötr bölümünde taşıyıcı dalganın yayılma hızında bir başka gecikme gerçekleşir. İyonosferin tersine, atmosferin bu bölümü dağıtıcı olmayan bir katmandır. Troposferik gecikme sıcaklık, basınç ve nemdeki değişimlere bağlıdır ve uydu eğim açısı ile alıcının bulunduğu yerin yüksekliğinin bir fonksiyonu olarak karakterize edilir (Brunner ve Welsch, 1993). Troposferik gecikme etkisinin modellenebilmesi için atmosferik özelliklere ilişkin bilgiye ihtiyaç duyulur. Troposferdeki gecikme, iyonosferdeki tersine kod ve taşıyıcı faz ölçmelerinde aynı değere sahiptir. Troposfer GPS L bant sinyalinin, sinyal zayıflaması, pırlı ve gecikme bakımından etkiler. Troposferik gecikme ve geliştirilen modeller bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak ele alınmaktadır.

3.3.4 Alıcının noise etkisi

Radyo bazlı iletişim ve navigasyon sistemlerinde noise etkisi çeşitli kaynakların etkisiyle ortaya çıkar. Noise, donanımın kendisinden ve yeryüzü ya da uzaydaki doğal faktörlerden kaynaklanabileceği gibi radyo vericileri ve motorlar gibi diğer elektrikli aletlerden de kaynaklanabilir. Genel olarak, sistem dışındaki faktörlere bağlı olarak ortaya çıkan noise etkisi frekansla ters, dalga boyu ile ise doğru orantılıdır. Örneğin 300 kHz gibi düşük bir frekansta, atmosferik ya da elektrik noise miktarı 300 MHz gibi yüksek bir frekanstakinden çok daha fazla olacaktır. Kablosuz alıcıların içinde ortaya çıkan ve dahili noise olarak bilinen noise ise frekansa daha az bağlıdır.

GPS alıcıları, statik ve kinematik uygulamalarda konum hesabı için kullanılan alıcı izleme lupları kod ve taşıyıcı faz ölçüsü üretirler. Anten, önyükseletç (preamplifier), referans osilatörü, frekans birleştiricisi (synthesiser), çevirgeç (downconverter), ara frekans kesiti, sinyal değerlendirme ve uygulama bölümlerinden oluşan bir GPS alıcısı da aynı şekilde noise etkisine maruz kalır (Van Dierendonck, 1996). Gerçekte GPS alıcıları GPS ölçmelerini mutlak bir presizyonla gerçekleştiremezler. Daima ölçüleri bozan belli düzeyde noise söz konusudur (Langley, 1997b). Alıcı noise miktarı, bir GPS alıcısının kod uzunluğu ve taşıyıcı faz ölçülerini ne kadar iyi gerçekleştirdiğinin bir göstergesidir. Alıcı noise miktarının büyüklüğü, kod ve taşıyıcı faz ölçmeleri için sırasıyla çip uzunluğu ve dalga boyu ile orantılıdır (NRC, 1995). GPS antenleri de doğal yolla üretilmiş elektromanyetik radyasyon formunda belli bir miktar noise oluşumuna neden olurlar (NRC, 1995; Langley, 1997b).

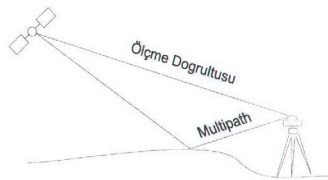
Kod uzunluğu ölçülerindeki alıcı noise oluşumu, alıcının herhangi bir iletkenindeki elektronların rastlantısal hareketleri ile üretilen yüksek frekanslı termal noise ve kod izleme lupundaki dinamik gerilim etkisi sonucu gerçekleşir (Leva ve diğ., 1996). Alıcı noise oluşumuna yol açan diğer kaynaklar ise donanım ve yazılım çözünürlüğü ile osilatörün stabilitesidir. Faz ölçülerindeki alıcı noise oluşumu ise yine termal noise, dinamik gerilim ve osilatör faz noise miktarına bağlı olarak gerçekleşir (Ray, 2000). GPS ölçülerine etki eden noise, doğrudan alıcının ölçülen sinyal-noise oranı (signal-to-noise ratio – SNR) ile ilişkilidir. Ölçmelere etki eden noise miktarı arttıkça, SNR değeri azalır. SNR eğim açısıyla doğru orantılı olarak azaldığı için, ölçmelerdeki noise miktarının azalan eğim açısıyla arttığı söylenebilir. Sonuç olarak,

taşıyıcının SNR değerinin faz ölçme doğruluğunu doğrudan etkilediğini söyleyebiliriz (Tiberius ve diğ., 1999).

Günümüzün modern alıcılarının çoğunda, alıcı noise hatası kod ölçüleri için bir kaç desimetre, taşıyıcı faz ölçüleri içinse bir kaç milimetre düzeyindedir. Van Dierendonck (1995), Van Dierendonck (1996), Langley (1997b), Braasch ve Van Dierendonck (1999) alıcı yapısı, terminolojisi ve noise etkisi hakkında ayrıntılı bilgi vermektedir.

3.3.5 Multipath

GPS sinyallerinin alıcıya iki ya da daha fazla yol üzerinden ulaşmasıyla sonuçlanan bir yayılma fenomeni olan multipath etkisi, GPS ile konum belirlemede en önemli hata kaynağı olarak görülmektedir. Multipath sinyal modülasyonu ile taşıyıcı fazı bozar ve böylece ulaşılan doğruluğu azaltır. Multipath hataları, doğrudan alıcıya ulaşan sinyallerle su yüzeyi, metalik yüzeyler, binalar vb objelerden yansıyan sinyallerin birlikte alıcıya ulaşması sonucu ortaya çıkar ve elde edilen sinyalin yansyarak alıcıya ulaşan sinyaller nedeniyle bozulmasına yol açar (NRC, 1995). Multipath etkisine yol açan etmenler arasında atmosferik etkiler, iyonosferik yansıma ve refraksiyon etkileri de vardır. Multipath hatasının yol açtığı diğer etkileri yapıcı ve yıkıcı enterferans ve sinyal faz kayıklığıdır. Şekil 3.4'te gösterilen multipath etkisi, özellikle de büyük yansıtıcı yüzeylerin yakınındaki istasyonlarda yapılan statik ölçmelerde etkisini hissettirir. Alıcı noise hatasında olduğu gibi, multipath etkisinin büyüklüğü kod ve taşıyıcı faz ölçmeleri için sırasıyla çip uzunluğu ve dalga boyu ile orantılıdır.



Şekil 3.4: Multipath etkisi

Multipath etkisi nedeniyle, ekstrem durumlarda 20 m'ye kadar ulaşan uzunluk hatası meydana gelebilir. Hala bilinmeyen bir fenomen olan multipath etkisi, ölçme

doğrultusu ufka yaklaştıkça daha da signifikant hale gelir. Ancak birbirlerini izleyen günlerde yapılan GPS ölçülerinin değerlendirilmesi ile elde edilen sonuçlar multipath hatasının ardışık günlerde hemen hemen aynı düzeyde gerçekleştiğini ortaya koymaktadır ve bu da bu etkinin uygun bir algoritma ile modellenebilmesi anlamına gelmektedir. Son yıllarda araştırmacılar bu tür multipath azaltma teknikleri üzerinde çalışmaktadır (Weill, 1997; Han ve Rizos, 2000; Ge ve diğ., 2000, Ge ve diğ., 2002; Ray, 2000). Bu çalışmalar özellikle de kabul edilemez hatalardan kaçınmak için yer seçiminde özel itina gösterilen sabit izleme ya da referans istasyonları açısından son derece önemlidir.

Multipath etkisini azaltmak için uygulanan yollar arasında özel olarak multipath etkisini azaltacak şekilde tasarlanmış antenlerin kullanımı ve dikkatli yer seçimi (örneğin, bir çok ölçme çalışması sırasında çok güç olsa da, yansıtıcı yüzeylerden uzak durmak) gibi yaklaşımlar vardır. İleri sinyal değerlendirme yöntemleri ile multipath etkisini etkili olarak azaltmak amacıyla yeni anten türleri ve yeni alıcı teknolojisi geliştirme konulu çalışmalar devam etmektedir (Rizos, 1997).

4. GPS SİNYALLERİ ÜZERİNDEKİ TROPOFERİK ETKİLER

Daha önce de belirtildiği üzere, GPS, VLBI (Very Long Baseline Interferometry – Çok Uzun Bazlı Enterferometri) gibi uzay tabanlı jeodezik sistemlerde, kısıtlayıcı olan başlıca hata faktörlerinden bir tanesi elektromanyetik sinyallerin, troposferden geçerken ortaya çıkan gecikmesidir. Elektromanyetik sinyaller, troposfer ve stratosferdeki elektriksel olarak nötr olan atom ve moleküllerden dolayı ortaya çıkan atmosferik kırılmadan (refraction) etkilenmektedir. Troposferik yayılma gecikmesi, kırılma indisi ya da refraktiviteyle doğrudan ilişkilidir. Troposferdeki bir hava parçacığının refraktivitesi GPS sinyalinin L_1 ve L_2 frekanslarında grup ve faz hızlarını etkilemektedir. Bu refraktivite atmosferik basınç, sıcaklık ve nemin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Telafi edici herhangi bir yöntem uygulanmaz ise troposferik gecikme, kod ve taşıyıcı faz hatalarının artmasına neden olur, ki bu hatalar zenit doğrultusundaki bir uydudan 2 metre iken, alçak bir uydudan 20 metreyi aşabilir (Hay ve Wong, 2000). GPS ölçümlerinde, genellikle hidrostatik ve ıslak bileşenlere bölünmüş olan troposferik geçiş gecikmesi, atmosfer profillerinin yaklaşıklıklarına dayanılarak oluşturulan modeller ile belirlenmektedir. Bu bölümde, troposferik kırılma ile bağlantılı olarak troposferik gecikme ile geleneksel ve yakın zamanda geliştirilmiş olan troposferik modeller incelenmektedir.

4.1 Troposferik Kırılma ve Gecikme

Radyo sinyalleri dünyanın atmosferini geçerken, troposferin kırılma indisindeki değişkenliklerden önemli ölçüde etkilenmektedir. Kırılma indisi fazladan bir yol gecikmesi ortaya çıkarmaktadır. Aynı anda, değişken yükseklikteki kırılma indisi değişimleri ışında bir eğilmeye neden olmaktadır (Zhang, 1999). Kırılma etkisi, ışının gerçek izi ve iz boyunca gazların kırılma indisine dayanan bir gecikme ortaya çıkarmaktadır. Nötr atmosferin büyük bölümü troposferin içerisinde yer aldığından

gecikme, troposferik gecikme olarak bilinmektedir. Nötral atmosferin kırılma etkisi, aşağıdaki integral denkleminin ilk yaklaşılığında ifade edilmektedir:

$$d_{trop} = \int_{r_r}^{r_a} [n(r) - 1] \sec \psi(r) dr + \left[\int_{r_r}^{r_a} \sec \psi(r) dr - \int_{r_r}^{r_a} \sec z(r) dr \right] \quad (4.1)$$

Burada d_{trop} troposferik gecikme, n kırılma indisi, r_r GPS alıcı antenin jeosentrik yarıçapı, r_a nötral atmosferin tepesinin jeosentrik yarıçapı, ψ görünen (apparent) zenit açısı ve z de gerçek zenit açısıdır. Yukarıdaki denklem, küresel olarak simetrik bir atmosfer içindir. Birinci integral, kırılma etkisine maruz kalmış ışın yolunun (transmission path) elektromanyetik ve geometrik uzunluklarındaki farkları belirtmektedir. Köşeli parantez içerisindeki integraller yol eğriliğini (path curvature) ifade etmektedir. Eğrilik etkisi genellikle yalnızca 70-80°'den büyük zenit açılarında önemlidir. Buna göre, köşeli parantez içerisindeki ifadeler uygulamada genellikle ihmal edilir (Janes ve diğ., 1991). Dolayısıyla, yol eğriliği ihmal edilerek, zenit yönünden gelen bir sinyal için zenit troposferik gecikmesi, küresel olarak simetrik bir atmosfer kabulü ile aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$d_{trop}^z = \int_{r_r}^{r_a} [n(r) - 1] dr = 10^{-6} \int_{r_r}^{r_a} N(r) dr \quad (4.2)$$

Burada N refraktivitedir (Bisnath ve diğ., 1997). Zenit troposferik gecikmesi hidrostatik gecikme (ya da daha eski modellerde kuru gecikme) ile ıslak gecikmeden oluşmaktadır. Zenit gecikmesinin hidrostatik bileşeni, hassas istasyon basınç ölçümleri mevcutsa ve atmosferin hidrostatik dengede olduğu kabulü ile, birkaç milimetre presizyonunda modellenebilir. Ancak ıslak bileşen hem uzaysal hem de zamansal olarak çok değişkendir. Geleneksel yüzey meteorolojik ölçümleriyle üretilen bir model tahmini, atmosferik koşullara bağlı olarak ancak 1 ila 2 cm'lik bir doğruluk verecektir (Langley, 1998). Hidrostatik gecikme, toplam troposferik gecikmenin yaklaşık %90'ı kadardır ve deniz düzeyinde yaklaşık 2.3 metredir. 0.3 mbar'dan daha düşük hata ile yapılan yüzey basınç ölçümleri kullanılarak bu gecikme 1 mm'den daha iyi doğrulukla tahmin edilebilir. Ancak yüksek değişkenliğe sahip olan zenit gecikmesi, 0 ile 0.4 m arasında değişmektedir ve yüzey ölçümleri ile

doğru olarak belirlenememektedir (Nam ve diğ., 1996). Bağılı konum belirlemede, troposferik gecikmedeki bir hatanın baz uzunluğu üzerindeki etkisi, eğer zenit gecikmeleri her iki istasyonda da benzer ise daha az zararlıdır. Genel olarak baz uzunluğu ne kadar düşük ise ve iki istasyon arasındaki yükseklik farkı ne kadar az ise zenit troposferik gecikmesinin benzer olma olasılığı daha yüksek olur.

Troposferik gecikme algoritmaları havanın kırılma özelliklerine dayanmaktadır. Havanın kırılma denklemi aşağıdaki gibidir:

$$N = (n-1) \cdot 10^{-6} = K_1 \left(\frac{P_d}{T} \right) Z_d^{-1} + \left[K_2 \left(\frac{e_0}{T} \right) + K_3 \left(\frac{e_0}{T^2} \right) \right] \cdot Z_w^{-1} \quad (4.3)$$

Burada P_d atmosferdeki kuru gazların kısmi basıncı, e_0 su buharının kısmi basıncı, T mutlak ısı, Z_d kuru hava için sıkıştırılabilirlik (compressibility) faktörü, Z_w su buharı için sıkıştırılabilirlik faktörü ve K_i de empirik olarak belirlenen sabitlerdir. Mikrodalgalar için Thayer (1974) tarafından verilen sabitlerin değerleri $K_1=77.604 \pm 0.014 \text{ K mbar}^{-1}$, $K_2=64.790 \pm 10 \text{ K mbar}^{-1}$ ve $K_3=377600 \pm 3000 \text{ K}^2 \text{ mbar}^{-1}$ dir.

Jeodezik uygulamalarda, mapping fonksiyonları ile, zenit gecikmeleri kullanılarak bir sinyalin herhangi bir eğim açısında alacağı gecikme değeri belirlenebilir. Mapping fonksiyonları, aşağıdaki denkleme göre hidrostatik ve ıslak bileşenler için ayrı ayrı tanımlanabilir:

$$d_{trop} = d_h^z m_h(\varepsilon) + d_w^z m_w(\varepsilon) \quad (4.4)$$

Burada d_h^z çoğunlukla kuru gazlardan kaynaklanan hidrostatik zenit gecikmesi, d_w^z su buharından kaynaklanan zenit gecikmesi, m_h mapping fonksiyonunun hidrostatik bileşeni, m_w mapping fonksiyonunun ıslak bileşeni ve ε da yer istasyonundaki kırılmamış eğim açısıdır. Mapping fonksiyonlarının bazıları kırılmış eğim açısını kullanmaktadır (Mendes ve Langley, 1994).

4.2 Zenit Gecikme Modelleri ve Mapping Fonksiyonları

Mapping fonksiyonları yaklaşık otuz yıldır kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda uydu jeodezisi verilerinin değerlendirilmesinde kullanılmak için, radyoson (radiosonde) ya da su buharı radyometre (Water Vapour Radiometry – WVR) verileri ile türetilen bir dizi mapping fonksiyonu geliştirilmiştir. Radyosonlar, bir nominal yükseliş esnasında çeşitli yüksekliklerde çevredeki havanın basıncı, ısı ve nemini ölçer. Ardından radyoson verileri kırılma değerlerini hesaplamakta kullanılır (Brunner ve Welsch, 1993). Islak gecikmenin hesabı için kullanılan bir başka yöntem, yer bazlı mikrodalga radyometresine dayanmaktadır. Jeodezik sinyallerin ıslak gecikmesinin belirlenmesinde kullanılan bir radyometre, su buharı radyometresidir (WVR). Yere yerleştirilen WVR, göğü tarar ve görüş çizgisi üzerindeki bütün su buharının parlaklık ısını (radyasyon enerjisi) ölçer. Bu ölçüm ıslak kırılma integralinin tahmininin elde edilmesinde kullanılır. Gök parlaklık ısıları iki frekansta ölçülür ve ardından bu ölçümler atmosferik opasitelere dönüştürülür (Coster ve diğ., 1996; Zhang, 1999).

Mapping fonksiyonları, gerçek yol gecikmesini, eğim açısının ve meteorolojik koşulların bir fonksiyonu olarak, zenit doğrultusundaki yol gecikmesi ile doğru olarak bağlantılandırmayı hedefler. Bunlar, hidrostatik, ıslak ve toplam gecikme mapping fonksiyonu olarak üç sınıfa ayrılabilir. Zenit doğrultusundaki hidrostatik gecikme toplam yüzey basıncının bir fonksiyonudur ve milimetre hassasiyetinde tahmin edilebilir. Zenit ıslak gecikmesi, toplam tahmin edilebilir suyun, ya da bir başka deyişle kullanıcının üzerindeki hava sütunundaki su buharı miktarının bir fonksiyonudur. Atmosferik su buharının yüksek değişkenlik özelliğinden dolayı, ıslak gecikmenin hassasiyeti santimetre, hatta desimetre düzeyindedir (Collins ve Langley, 1998). Zenit gecikmesi için üretilen bir mapping fonksiyonu modeli, başka modellerle birlikte kullanılabilir. Bu bölümde Hopfield ve Saastamoinen troposferik gecikme modelleri ve Marini, Chao, Lanyi, Davis (CfA2.2), Herring (MTT), Ifadis, Niell (NMF) ve Yan (UNSW931) gibi yaygın olarak bilinen mapping fonksiyonları incelenmiştir.

4.2.1 Hopfield modeli

Hopfield modeli hidrostatik ve ıslak kırılma bileşeni tanımlarını kullanır. Bu model, yüzeyden yaklaşık 40 km.'lik bir yüksekliğe kadar uzanan bir tek tabakalı politropik model atmosfere dayandırılmaktadır. Hopfield tarafından verilen ilgili ifadeler şöyledir:

$$N_h(h) = N_{h,0} \left(1 - \frac{h}{h_h}\right)^4 \quad \text{eğer } h \leq h_h = 43km \quad (4.5)$$

ve

$$N_w(h) = N_{w,0} \left(1 - \frac{h}{h_w}\right)^4 \quad \text{eğer } h \leq h_w = 12km \quad (4.6)$$

Burada, $N_{h,0}$ ve $N_{w,0}$ yüzeydeki hidrostatik ve kırılma indisleri ve h kullanıcının referans elipsoidine göre yüksekliğidir (Spilker, 1996b). $N_{h,0}$ ve $N_{w,0}$ yüzey kırılmalarının ölçüldüğü yüzey düzeyi üzerindeki yükseklik ile ilgili, hidrostatik ve ıslak terim ölçek yükseklikleri (term scale height) olan h_h ve h_w terimleri için farklı değerler önerilmiştir. Bunun nedeni konum ve sıcaklığa bağımlı olmalarıdır. Örneğin Janes ve diğ. (1991), bu değerleri aşağıdaki gibi vermektedir:

$$h_h = 40136 + 148.72(T_0 - 273.16) \text{ [metre]} \quad (4.7)$$

$$h_w = 11000m$$

Burada T_0 , istasyondaki Kelvin cinsinden sıcaklıktır. Bu hidrostatik ve ıslak terim ölçek yükseklikleri, batı yarıküresinde dağılmış olan 14 mekanda elde edilen bir yıllık radyoson verilerinin uyduurulması (fitting) ile türetilmiştir. Ardından troposferik zenith gecikmesi d_{trop}^2 , yukarıdaki denklemlerin aşağıdaki gibi birleştirilmesi ile elde edilir. (Janes ve diğ., 1991).

$$d_{trop}^z = 10^{-6} \int_0^{h_h} N_{h,0} \left(1 - \frac{h}{h_h}\right)^4 dh + 10^{-6} \int_0^{h_w} N_{w,0} \left(1 - \frac{h}{h_w}\right)^4 dh \quad (4.8)$$

$$= \frac{10^{-6}}{5} [N_{h,0} h_h + N_{w,0} h_w] = d_h + d_w$$

Burada d_h ve d_w hidrostatik ve ıslak gecikmeleri göstermektedir.

Hopfield tarafından üretilen hidrostatik ve ıslak mapping fonksiyonları aşağıda verilmiştir (Hofmann-Wellenhof, 1997):

$$m_h(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \sqrt{\varepsilon^2 + 6.25}} \quad (4.9)$$

$$m_w(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \sqrt{\varepsilon^2 + 2.25}} \quad (4.10)$$

4.2.2 Saastamoinen modeli

Saastamoinen modeli, hidrostatik bileşen tanımlarını kullanmaktadır (Saastamoinen, 1973). Bu modelde hidrostatik basınç, troposfer için sabit yüksekliğe bağlı değişim (lapse) oranı, troposferin üstü için de hidrostatik izotermal model kullanılarak modellenir. Sıcaklığın düşey gradyanı $T = T_0 + \beta(r - r_0)$ 'dir ve sonuçta ortaya çıkan basınç profili $P = P_0(T / T_0)^{-Mg / R\beta}$ 'dir. Burada β sıcaklığın yüksekliğe bağlı değişim oranı, r jeosentrik yarıçap ($r = R_e + h$, burada R_e dünyanın yarıçapıdır), r_0 istasyonun yarıçapı (genellikle $r_0 = R_e$), T_0 istasyondaki sıcaklık değeri, P_0 yüzey basıncı, M havanın molar kütlesi, g yerçekimi ivmesi ve R de evrensel gaz sabitidir. r yarıçapı r_0 ile r_T arasındaki değerleri almaktadır; r_T troposfere olan yarıçapı temsil etmektedir. Buna karşılık gelen kuru refraktivite $n - 1 = (n_0 - 1)(T / T_0)^\mu$ şeklindedir; burada $\mu = (-Mg / R\beta) - 1$ üstel bir sabittir. Basınç, troposferdeki ilk değerine göre üstel olarak düşmektedir.

$$P = P_T \exp \left[-\frac{gM}{RT_T} (h - h_T) \right] \quad (4.11)$$

Burada T alt indisi tropopozdaki değerleri göstermektedir (Spilker, 1996b). Islak kırılma kısmi su buharı basıncına (e_0) bağlıdır. Saastamoinen troposferik gecikme için hem presizyonlu bir model hem de standart bir model açıklamıştır. Troposferik gecikme için standart model aşağıdaki gibidir:

$$d_{trop} = \frac{0.002277}{\cos \psi} \left[P_0 + \left(\frac{1255}{T_0} + 0.05 \right) e_0 - B \tan^2 \psi \right] + \delta_R \quad (4.12)$$

Burada δ_R metre cinsinden gecikme düzeltmesidir; P_0 , e_0 milibar, T_0 ise Kelvin cinsindedir. ψ görünen zenit açısıdır. B ve δ_R düzeltme terimleri bazı kitaplarda bulunabilmektedir (örneğin Hofmann-Wellenhof ve diğ., 1997).

Saastamoinen'in elde ettiği sonuçlar, atmosferin hidrostatik denge içinde olması durumunda nemli havanın kırılmasındaki P/T teriminin yoğunluk integraline indirgenebileceğini göstermektedir. Zenit doğrultusunda olan yoğunluk integrali yerçekiminin yükseklikten bağımsız olması durumunda doğrudan toplam yüzey basıncı ile orantılıdır. Saastamoinen ayrıca, basıncı, yalnızca elipsoide göre istasyonun enlem ve yüksekliğine bağımlı olan gecikmeye dönüştürmek için kullanılan efektif yerçekimi değeri için bir ifade vermiştir. Saastamoinen 10° 'den büyük eğim açıları için model oluşturduğu için, zenit gecikmesi düşük eğim açıları için $1/\sin(\varepsilon)$ eşitliği ile belirlenmektedir (Niell, 1996).

Kuru gazların zenit etkisi için üretilen Hopfield ve Saastamoinen modelleri, ışın izleme (ray tracing) sonuçları ile, santimetrenin altındaki değerlerde çakışmaktadır. Hopfield modeli hidrostatik zenit gecikmesinde, ışın izleme yönteminin verdiğiinden daha düşük bir değişkenlik gösterme eğilimindedir. Buna göre düşük enlemlerde daha düşük, yüksek enlemlerde daha büyük değerler vermektedir; bu da Hopfield modelinin formülasyonunda su buharı miktarının dolaysız etkisinin ve Hopfield veri kümesinde daha çok orta enlemlerde toplanmış verilerin ağırlık taşıdığına bir göstergesidir. Bu, nemli havanın molar kütledeki değişkenliklerin ele alınmasıyla anlaşılabilir. Molar kütle, buhar yoğunlaşmasına

bağlı olarak 28.9644 kg/kmol (kuru hava) ve 18.9644 kg/kmol (su buharı) arasında değişmektedir (Janes ve diğ., 1991).

4.2.3 Marini mapping fonksiyonu

Marini (1972), atmosferin azimutal olarak simetrik kabul edilmesi durumunda atmosferik gecikme için mapping fonksiyonlarının $1/\sin(\varepsilon)$ değerine göre sürekli kesir formunda ifade edilebileceğini vurgulamaktadır. Buradaki ε refrakte olmamış eğim açısıdır. Marini dördüncü kesire dek genişlettiği formülün uygulanmasıyla elde edilen sonuçları ışın izleri ile karşılaştırmış ve zenit doğrultusundan 1° 'nin altındaki eğim açısına kadar %0.3'dan daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini bulmuştur. Bunun yanı sıra, mapping fonksiyonu parametrelerinin ampirik olarak elde edilmesi durumunda bu hatanın %0.1 düzeyine indirgenebileceğini ifade etmektedir. Mapping fonksiyonu parametreleri atmosferik özellikler ile belirlenebilir. Marini'nin mapping fonksiyonunda yol eğriliği ihmal edilmektedir. Bu nedenle, bu prosedür ile elde edilen doğruluk düşük eğim açılarında düşük olacaktır (Marini, 1972).

Marini (1972) sürekli kesir formundaki mapping fonksiyonunu aşağıdaki gibi tanımlamaktadır:

$$m(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{a}{\sin \varepsilon + \frac{b}{\sin \varepsilon + \frac{c}{\sin \varepsilon + \dots}}}} \quad (4.13)$$

Burada a , b , c, \dots değerleri katsayılarıdır. Marini, çalışmasında eğim açısı ve uzunluk hataları için katsayı değerleri geliştirmiştir (Marini, 1972).

Marini çeşitli katman türleri için gereken katsayıların hesabını sağlayan ifadelerin geliştirilmesine izin verse de, katsayıların ışın izleme profili verileri üzerinde ampirik uydurma ile belirlenmesi daha yaygın olarak uygulanmıştır. Ampirik yaklaşım hesaplama açısından daha kolay ve düşük eğim açılarındaki yol eğriliğini hesaplayan bir fonksiyon geliştirilmesini sağlar. Ancak sonuçta elde edilen katsayıların fiziksel açıdan net bir şekilde yorumlanabilmeleri kolay değildir ve bu katsayılar bazı

durumlarda, türetildikleri temsili profillerin lokal ya da mevsimsel değişkenliklerine kolayca adapte edilemeyebilirler (Janes ve diğ., 1991).

4.2.4 Chao mapping fonksiyonu

Chao'nun amacı Mars 1971 uzay aracının Kaliforniya, İspanya, Güney Afrika ve Avustralya'da kurulu antenlerin oluşturduğu Deep Space Açı üzerinden radyo tekniği ile izlenmesinde kullanılmak üzere troposferik düzeltmeleri türetmekti. Chao mapping fonksiyonu, bir yıl boyunca Kaliforniya Edwards AFB'de toplanan radyoson ölçmelerinden türetilmiş ortalama kırılma profillerinin uydurulmasına dayanmaktadır. Her anten için yakınlarında bulunan istasyonlarda toplanmış radyoson verilerine dayalı olarak elde edilmiş ortalama yüzey meteorolojik verileri, hidrostatik ve ıslak zenit gecikmesi için verilen ifadelerde kullanılmıştır. 3°'ye kadar eğim açıları için verilen hidrostatik ve ıslak mapping tabloları, ortalama yıllık kuru ve ıslak kırılma profillerinin ışın izleme yoluyla analitik olarak temsili ile hesaplanmıştır. Chao, hidrostatik ve ıslak bileşenler için ayrı ayrı olmak üzere, gecikme etkisinin modellenmesinde Marini'nin sürekli kesir formunu kullanmıştır. Chao tarafından geliştirilen hidrostatik ve ıslak mapping fonksiyonları aşağıda verilmektedir (Spilker, 1996b):

$$m_h(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{0.00143}{\tan \varepsilon + 0.0445}} \quad (4.14)$$

$$m_w(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{0.00035}{\tan \varepsilon + 0.017}} \quad (4.15)$$

Yukarıda verilen mapping fonksiyonlarıyla Marini'nin sürekli kesir ifadesi arasındaki küçük farklar, bu eşitliklerde sadece ilk iki terimin kullanılması ve ikinci $\sin(\varepsilon)$ teriminin yerini $\tan(\varepsilon)$ ifadesinin almasıdır. İkinci değişlikle $m(90^\circ)=1$ olması sağlanmaktadır. Ortalama yıllık kırılma profillerinin ışın izlerine göre, hidrostatik Chao mapping fonksiyonunun doğruluğu 1°'lik eğim açısına kadar %1 dolayındadır. %1'lik hata, 5°'lik eğim açısı için yaklaşık 230 mm gecikme anlamına gelmektedir ve bu değer, uzay aracının radyo tekniği ile izlenmesi için gereksinim duyulan

doğruluk açısından yeterlidir. Bu değerin yüksek doğruluk gerektiren jeodezik uygulamalar için yeterli olduğunu söylemek mümkün değildir. Ancak ıslak Chao mapping fonksiyonu, yeteri kadar doğruluk sağladığı için uydu jeodezisi uygulamalarında kullanılmıştır (Niell, 1996).

4.2.5 Lanyi mapping fonksiyonu

Kullanılan mapping fonksiyonları arasında en kompleks olanı Jet Propulsion Laboratuvarı'nda Lanyi tarafından geliştirilen fonksiyondur. Lanyi, kuru ve ıslak refraktivite momentleri açısından atmosferik gecikmeye ilişkin bir genişleme katsayısı tanımlayarak, hem hidrostatik hem de ıslak bileşenleri içeren tek bir mapping fonksiyonu türetmiştir. Lanyi mapping fonksiyonu yarı analitik bir yaklaşımla 6° 'ye kadar inen eğim açılarına uygun olacak şekilde geliştirilmiştir. Üç lineer bölüm ısı profilleri kullanır. Nötr-atmosfer yayılma gecikmesi, refraktivitede ikinci ve derece terimleri eğilme (bending) etkisini tanımlayacak şekilde üçüncü dereceye dek genişletilmiştir. Bir ortalama profile göre enlem ve istasyona bağımlı değişimler, tropopoz yüksekliği, inversiyon yüksekliği ve sıcaklığın yüksekliği bağımlı değişim oranı (temperature lapse rate) verileri ile modellenilebilir (Mendes ve Langley, 1998). Gecikme fazlalığı (excess delay) aşağıdaki gibidir:

$$\Delta(\varepsilon) = \frac{F(\varepsilon)}{\sin(\varepsilon)} \quad (4.16)$$

Burada,

$$F(\varepsilon) = d_h F_h(\varepsilon) + d_w F_w(\varepsilon) + \left(\frac{d_h^2}{D_s}\right) F_{b1}(\varepsilon) + \left(\frac{2d_h d_w}{D_s}\right) F_{b2}(\varepsilon) + \left(\frac{d_w^2}{D_s}\right) F_{b3}(\varepsilon) + \left(\frac{d_h^3}{D_s^2}\right) F_{b4}(\varepsilon) \quad (4.17)$$

ve d_h ve d_w terimleri hidrostatik ve ıslak zenit gecikmesi, D_s ölçek yüksekliği (≈ 8.567 km) ve F_{b1} , F_{b2} , F_{b3} , F_{b4} , çeşitli karmaşık mapping fonksiyonlarıdır.

Troposferik gecikme için genel genişlik şu şekilde yazılabilir:

$$A(\varepsilon) = \frac{(0.02312)P_m [T - 4.11 + 5(r_m - r_{at})/148.98]}{T \sqrt{1 - \left[\frac{r_{at} \cos \varepsilon}{r_m + (1-C)(r_h - r_m)} \right]^2}} + \frac{(0.0746)e_0 h_w [1 + 5(r_m - r_{at})/h_w]}{T^2 \sqrt{1 - \left[\frac{r_{at} \cos \varepsilon}{r_m + (1-C)h_w} \right]^2}} \quad \varepsilon > 6^\circ \quad (4.18)$$

Burada P_m kilopaskal biriminde izleme istasyonu barometrik basıncı, T Kelvin birimine dönüştürülmüş izleme istasyonunda ölçülen sıcaklık, r_m meteorolojik sensörlerin jeosentrik yarıçapı, r_{at} izleme istasyonundaki antenin jeosentrik yarıçapı, r_h troposferik hidrostatik yarıçap, ε eğim açısı, h_w ıslak troposfer yüksekliği, e_0 kısmi su buharı basıncı ve C varsayılan integrasyon katsayısıdır ($\varepsilon > 6^\circ$ ise 0.85) (Spilker, 1996b).

4.2.6 Cfa2.2 mapping fonksiyonu

Davis ve diğ. (1985) tarafından Harvard Smithsonian Astrofizik Merkezinde geliştirilen ve Cfa2.2 olarak bilinen mapping fonksiyonu da Marini'nin sürekli kesir formuna dayalıdır. Davis ve diğ., Marini'nin sürekli kesir ifadesine bir üçüncü derece ekleyerek 5° 'lik eğim açısına dek bir santimetrenin altında doğruluk sağlamayı amaçlamışlardır. Chao'nun mapping fonksiyonunda olduğu gibi, mapping fonksiyonunun zenit doğrultusunda 1.0 değerini almasını garanti altına almak için ikinci sinüs terimi bir tanjant terimiyle değiştirilmiştir. Bu değişikliğin yol açacağı dezavantaj ise daha yüksek eğim açıları için (20° - 60°) $\tan(\varepsilon)$ değerinin $\sin(\varepsilon)$ değerine çabucak yaklaşmamasıdır. Davis ve diğ. (1985) bu eğim açıları için atmosferik gecikme parametrelerinden kaynaklanan 1-2 mm büyüklüğünde bir hata beklenebileceğini vurgulamıştır. Cfa2.2 mapping fonksiyonunun katsayıları, ideal atmosfer modellerinde ışın izleme ile elde edilip; yüzey sıcaklığı, toplam basınç, kısmi su buharı basıncı, sıcaklığın yüksekliğe bağımlı değişim oranı ve tropopoz yüksekliğinin nominal değerlerine göre, lineer hareket (departure) fonksiyonları şeklinde ifade edilmişlerdir. Değerlendirmede kullanılan ışın izleme algoritması küresel olarak simetrik katmanlardan oluşan atmosfere dayalıdır. Bu mapping fonksiyonu sadece hidrostatik zenit gecikmesi için geliştirilmiş olsa da, ıslak gecikme için de kullanılabilir. Bu prosedür büyüklüğü tam olarak belirli olmayan “küçük” bir

hataya neden olur (Davis ve diğ., 1985). Davis ve diğ., hidrostatik gecikme için Saastamoinen modelinin biraz değiştirilmiş bir formunu vermektedir. Ayrıca atmosfer kompozisyonundaki değişkenlik ve fiziksel sabitlerin hassas olarak bilinmemesinden kaynaklı olan zenit gecikmesine ilişkin belirsizliği değerlendirmişlerdir. CfA2.2 fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$m(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{a}{\tan \varepsilon + \frac{b}{\sin \varepsilon + c}}} \quad (4.19)$$

Burada a , b ve c , ölçme ya da tahmin değerlerine dayanan ve aşağıdaki eşitliklerle verilen katsayılardır;

$$\begin{aligned} a &= 0.001185[1 + 0.6071 \times 10^{-4}(P_0 - 1000) - 0.1471 \times 10^{-3}e_0 + 0.3072 \\ &\quad \times 10^{-2}(T_0 - 20) + 0.1965 \times 10^{-1}(\beta + 6.5) - 0.5645 \times 10^{-2}(h_T - 11.231)] \\ b &= 0.001144[1 + 0.1164 \times 10^{-4}(P_0 - 1000) - 0.2795 \times 10^{-3}e_0 + 0.3109 \\ &\quad \times 10^{-2}(T_0 - 20) + 0.3038 \times 10^{-1}(\beta + 6.5) - 0.1217 \times 10^{-1}(h_T - 11.231)] \\ c &= -0.0090 \end{aligned} \quad (4.20)$$

ve ayrıca β sıcaklığın yüksekliğe bağımlı değişim oranı ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$ biriminde), h_T tropopoz yüksekliği (km biriminde), T_0 istasyondaki sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$ biriminde), P_0 yüzey basıncı (mbar biriminde) ve e_0 kısmi su buharı basıncıdır (mbar biriminde).

4.2.7 MTT mapping fonksiyonu

Herring (1992), gecikmenin istasyon enlem ve yüksekliğine, ayrıca verilen bir yüzey sıcaklığı için farklı enlemlerdeki yüzey sıcaklık profillerine olan bağımlılığını ortaya koydu. Herring, sıcaklık profillerindeki değişimleri (yüksekliğe bağlı değişim oranı ve tropopoz yüksekliği) sadece yüzey ısısının yüksekliğe bağlı değişim oranı ve tropopoz yüksekliği ile korelasyonlu olması açısından hesaba katmıştır. Hidrostatik mapping fonksiyonu için geliştirdiği formül aşağıda verilmiştir:

$$m_h(\varepsilon) = \frac{\left[1 + \frac{a_h}{1 + \frac{b_h}{1 + c_h}} \right]}{\left[\sin \varepsilon + \frac{a_h}{\sin \varepsilon + \frac{b_h}{\sin \varepsilon + c_h}} \right]} \quad (4.21)$$

Burada,

$$\begin{aligned} a_h &= [1.2320 + 0.0139 \cos \varphi - 0.0209h + 0.00215(T_0 - 10)] \times 10^{-3} \\ b_h &= [3.1612 - 0.1600 \cos \varphi - 0.0331h + 0.00206(T_0 - 10)] \times 10^{-3} \\ c_h &= [71.244 - 4.2930 \cos \varphi - 0.1490h - 0.00210(T_0 - 10)] \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (4.22)$$

ve φ istasyonun enlemi, h istasyon yüksekliği (km biriminde) ve T_0 yüzey sıcaklığıdır ($^{\circ}\text{C}$). Islak mapping fonksiyonu için aşağıdaki formül verilmektedir:

$$m_w(\varepsilon) = \frac{\left[1 + \frac{a_w}{1 + \frac{b_w}{1 + c_h}} \right]}{\left[\sin \varepsilon + \frac{a_w}{\sin \varepsilon + \frac{b_w}{\sin \varepsilon + c_w}} \right]} \quad (4.23)$$

Burada,

$$\begin{aligned} a_w &= [0.583 - 0.011 \cos \varphi - 0.0520h + 0.0014(T_0 - 10)] \times 10^{-3} \\ b_w &= [1.402 - 0.102 \cos \varphi - 0.1011h + 0.0020(T_0 - 10)] \times 10^{-3} \\ c_w &= [45.85 - 1.910 \cos \varphi - 1.2900h + 0.0015(T_0 - 10)] \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Görüldüğü gibi, Herring mapping fonksiyonu da Marini'nin sürekli kesir formuna dayanmaktadır. Hidrostatik ve ıslak mapping fonksiyonları, Kuzey Amerika'da 11 istasyonda yapılan radyoson ölçmeleri ile elde edilen sıcaklık ve su buharı profillerini

kapsayan atmosfer modelde iki yıl boyunca ışın izlenmesi yoluyla geliştirilmiştir. Herring bu fonksiyonları 3^o'lik eğim açısına kadar ölçülerin değerlendirilebilmesi için geliştirmiştir. Her ışın izi için, basınç değeri hidrostatik denge olduğu varsayımıyla saptanır. Entegrasyon yolu, bu yol boyunca her noktadaki toplam refraktivite ve gradyan değerleriyle belirlenir. Yol boyunca ortaya çıkan gecikme, ayrı ayrı olmak üzere hidrostatik bileşeni ile ilişkili olan refraktivite, ıslak düzeltme bileşeni ve ışın eğilmesinin yarattığı etkilerin birikiminden oluşur. İlk ışın zenit doğrultusundadır ve bu zenit gecikmeleri hidrostatik ve ıslak mapping fonksiyonlarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Geometrik eğilme terimleri hidrostatik ve ıslak mapping fonksiyonlarına eklenmiştir. Her bir ışın izleme işlemi sonrasında, mapping fonksiyon katsayıları hidrostatik ve ıslak bileşenler için ayrı ayrı olmak üzere en küçük kareler yöntemi ile belirlenmiştir. 5^o eğim açısında ışın izleme ile bu ampirik mapping fonksiyonları arasındaki tipik karesel ortalama farkları, hidrostatik gecikme için 30 mm, ıslak gecikme içinse 10 mm dolayındadır (Herring, 1992). Böylece, 3 mm'lik düşey doğruluk elde edilmesi için, 5^o eğim açısında hidrostatik mapping fonksiyonundaki belirsizliğin, bu eğim açısında toplam atmosferik gecikmenin yaklaşık %0.04'üne karşılık gelen 10 mm'nin altında bir değerde olması gereklidir. Islak mapping fonksiyonunda gereken değer daha az zordur, ancak bunun gerçekleştirilmesi zor olabilir (Niell, 1996).

4.2.8 Ifadis mapping fonksiyonu

Ifadis tarafından geliştirilen mapping fonksiyonu, CfA2.2 fonksiyonuna dayalıdır. Ifadis global ve iklimsel çözümler şeklindeki bu modellerin geliştirilmesi için üçüncü derece kesir formunu kullanmıştır (Ifadis, 2000). Önerilen fonksiyon şöyledir:

$$m(\varepsilon) = \frac{1}{\sin \varepsilon + \frac{a}{\tan \varepsilon + \frac{b}{\sin \varepsilon + 0.078}}} \quad (4.25)$$

Burada $m(90^\circ)=1$ ve,

$$a = b = k_1 + k_2(P_0 - 1000) + k_3(T_0 - 15) + k_4\sqrt{e_0} \quad (4.26)$$

4.2.9 Niell mapping fonksiyonu (NMF)

Niell mapping fonksiyonunda atmosferik gecikme, istasyon enlem ve yüksekliği ile yılın hangi gününde bulunulduğuna bağlı olarak modellenir. Niell hidrostatik ve ıslak mapping fonksiyonlarını geliştirmiştir. Niell, hidrostatik mapping fonksiyonunun solar aydınlanmanın değişkenliği nedeniyle enlem ve mevsime bağlı olması gerektiğini vurgulamaktadır. Ayrıca bu fonksiyon, atmosfer kalınlığının eğrilik yarıçapına oranı yükseklikle birlikte azaldığı için ölçme yapılan noktanın geoitten olan yüksekliğine de bağlı olmalıdır. Ancak ıslak mapping fonksiyonunda, su buharı hidrostatik denge durumunda olmadığı için, yüksekliğe göre dağılımının istasyon yüksekliğine göre tahmin edilmesi beklenemez (Niell, 1996). Her enlemden katsayılar 365.25 günlük bir zaman dilimi içerisinde sinüzoid şeklinde modellenir. Tüm verilerin bir arada değerlendirilmesi sonucunda elde edilen değere sahip olan yılın 28. günü mapping fonksiyonunun fazının tanımlanması için kullanılmıştır. Hidrostatik mapping fonksiyonunda, Ocak 0.0'dan (UT günü) başlayarak t zamanında tabular φ_i enleminde kullanılan a parametresi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$a(\varphi_i, t) = a_{avg}(\varphi_i) + a_{amp}(\varphi_i) \cos\left(2\pi \frac{t - T_0}{365.25}\right) \quad (4.27)$$

Burada, T_0 uygulanan ve yılın 28. gününe ait olan faz değeridir. $a(\varphi, t)$ değeri, en yakın $a(\varphi_i, t)$ değerleri arasında yapılacak lineer enterpolasyonla elde edilir. Diğer parametrelerin hesabında da benzer bir prosedür uygulanır. Hidrostatik ve ıslak mapping fonksiyonları için kullanılan parametreleri içeren tablolar, Niell (1996) tarafından verilmektedir.

Niell hidrostatik mapping fonksiyonu yüzeydeki meteorolojik durumdan bağımsızdır. Yüzeydeki meteorolojik durum yerine, yeryüzünden yaklaşık 1 km yükseklikteki ve ağırlıklı olarak mevsime bağlı atmosferik koşulların modelin oluşturulmasına daha büyük katkısı söz konusudur. Niell, hidrostatik mapping fonksiyonlarındaki değişimlerin, yaklaşık olarak atmosfer kalınlığının yeryüzü yarıçapına oranında, sıcaklık farklılaşmasına koşut olarak meydana gelen değişimlere bağlı olduğunu ifade etmektedir. Böylece, mapping fonksiyonlarının değişimleri atmosferin değişik yüksekliğe sahip bölümlerindeki sıcaklık değişimleri ile ilişkilendirilmiştir (Niell,

1996). Mapping fonksiyonu Marini fonksiyonuna dayalıdır ve Herring (1992) mapping fonksiyonunda olduğu gibi, zenit doğrultusunda normalize edilmiştir. Işın izleri, ABD Standart Atmosferlerinin standart sıcaklık ve bağıl nem değerlerini içeren dokuz veri kümesi üzerinde uygulanmıştır. Buradaki ABD Standart Atmosferleri, kuru hava için medyan orta enlem koşullarına yakın durağan durumu ifade eden ideal atmosferi temsil etmektedir. Hesaplamalar, Ocak ve Temmuz ayları için 15°, 30°, 45°, 60°, ve 75° kuzey enlemlerinde gerçekleştirilmiştir. Niell zaman içinde kuzey ve güney yarıkürelerin simetrik olduğunu, ekvatorial bölgenin 15° kuzey enlemi profili ile ve kutup bölgelerinin 75° kuzey enlemi ile tanımlandığını varsayımıştır. Bu varsayımlarla dokuz katsayı seti bütün enlemlerde yıllık değişimleri kaplayan yıllık iki ekstrem değere yakın mapping fonksiyonlarını temin eder. Daha sonra, yılın herhangi bir gününde herhangi bir enlemden yapılan ölçümler için gerekli katsayılar lineer enterpolasyonla elde edilir. Hidrostatik mapping fonksiyonu için, Ocak ve Temmuz katsayıları ayrı ayrı hesaplanmış, ancak ıslak mapping fonksiyonu için, Ocak profillerinden daha iyi olan Temmuz profiline ait katsayılar kullanılmıştır. Ek olarak, enlem ve mevsim bağımlılığı ve geoit yüksekliği dikkate alınmıştır. Hidrostatik mapping fonksiyonunun geoit yüksekliğine olan duyarlılığı, dokuz standart profile ışın izlenmesi işlemine, 1000 m yüksekliğindeki basınç, sıcaklık ve bağıl nem değerleri ile başlanarak belirlenir (Niell, 1996).

4.2.10 UNSW931 mapping fonksiyonu

Şangay Gözlemevinde Yan ve Ping tarafından tamamlayıcı hata fonksiyonunun sürekli ifadesine dayalı olan iki mapping fonksiyonu geliştirilmiştir (Yan ve Ping, 1995; Yan, 1998). Bu fonksiyonlardan biri CFA2.2 atmosferik profillerine ve diğer standart atmosferik parametrelere dayalıdır ve UNSW931 mapping fonksiyonu şeklinde tanımlanmaktadır. Diğer fonksiyonsa Hopfield (1969) tarafından verilen atmosferik profile dayanmaktadır. Bu bölümde sadece UNSW931 mapping fonksiyonu ele alınmıştır. Bu fonksiyon CFA2.2'de kullanılan parametrelerle 2.5° ve üzerindeki verilerin değerlendirilmesi için geliştirilmiştir. Spesifik olarak vurgulanmamış olsa da, UNSW931 fonksiyonunun CFA2.2 fonksiyonu gibi sadece hidrostatik gecikme bileşeninin tahmini için kullanılabilmesi, dolayısıyla bu durumda ıslak gecikmenin modellenmesinde bir hatanın ortaya çıkacağı düşünülmektedir (Mendes ve Langley, 1998).

$$m(z) = \frac{1}{\cos z + \frac{A_1}{I^2 \sec z + \frac{A_2}{\cos z + \frac{13.24969}{I^2 \sec z + 173.4233}}}} \quad (4.28)$$

Burada z gerçek zenit açısı ve I normalize edilmiş efektif zenit argümanıdır. A_1 ve A_2 katsayıları ise aşağıdaki gibi elde edilir:

$$I = \sqrt{\frac{r_0}{2H}} \cot z \quad (4.29)$$

$$A_1 = 0.5753868 + 0.5291 * 10^{-4} (P_0 - 1013.25) - 0.2819 * 10^{-4} e_0 - 0.9381 * 10^{-6} e_0^2 - 0.5958 * 10^{-3} (T_0 - 15) + 0.2657 * 10^{-5} (T_0 - 15)^2 \quad (4.30)$$

$$A_2 = 1.301211 + 0.2003 * 10^{-4} (P_0 - 1013.25) - 0.7285 * 10^{-4} e_0 + 0.2579 * 10^{-5} e_0^2 - 0.2595 * 10^{-2} (T_0 - 15) + 0.8509 * 10^{-5} (T_0 - 15)^2$$

Burada H efektif atmosfer yüksekliği, r_0 istasyonun jeosentrik yarıçapı; P_0 , T_0 ve e_0 ise sırasıyla istasyondaki basınç, sıcaklık ve kısmi su buharı basıncıdır.

UNSW931 mapping fonksiyonu Cfa2.2 mapping fonksiyonunun değiştirilmiş bir versiyonu olarak kabul edilebilir. Çünkü fonksiyonun geliştirilmesi Chebyshev uydurma (fitting) prosedürüne ve mapping fonksiyonu katsayılarının kestirimini optimize eden tamamlanmamış Γ fonksiyonuna dayalıdır. Dolayısıyla söz konusu olan işlem, Cfa2.2 fonksiyonu katsayılarının optimizasyonla iyileştirilmesidir.

4.3 Model Karşılaştırmaları

Jeodezik ölçüler üzerindeki kırılma etkisi en önemli hata kaynaklarından biri olduğu için bir çok çalışmaya konu olmuştur. Son yıllarda geliştirilen ve bir kısmı bu bölümde ele alınan çok sayıdaki mapping fonksiyonu da bunun bir göstergesidir. Bir çok araştırmacı bu fonksiyonları kapsamlıca ve karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. Bu araştırmaların çoğu radyoson ya da su buharı radyometresi

verileri kullanılarak mapping fonksiyonlarının karşılaştırılması şeklindedir. Bu bölümde elde edilen değerlendirme sonuçları özetlenmektedir.

Janes vd (1991) tarafından yapılan çalışmada ABD Standart Atmosferleri için üretilen kırılma indisi profilleri ile, troposferik gecikmenin çeşitli hidrostatik ve ıslak bileşenlerini sağlamak amacıyla ışın izleme işlemi uygulanmıştır. Ayrıca Hopfield ve Saastamoinen atmosferik modellerinin hidrostatik gecikme bileşenleri için de bu araştırmacılar tarafından tanımlanan standart atmosfer yüzeyi değerleri ve sıcaklık profilleri kullanılarak kırılma indisi profilleri üretilmiştir. Bu profiller için ışın izleme yöntemi ile üretilen sonuçlar, daha sonra ABD Standart Atmosferlerine karşı değerlendirilmiştir. Farklı zenit gecikme modelleriyle elde edilen sonuçlar, düşük ve orta enlemler arasında kalan bölgelerde Hopfield modelinin, orta ve yüksek enlemler arasında kalan bölgelerde ise Saastamoinen modelinin kendi elde ettikleri ile karşılaştırıldığında en yakın sonucu verdiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca her iki modelin de su buharı miktarına karşı görece düşük duyarlılık sergiledikleri vurgulanmaktadır. Üç mapping fonksiyonu, hidrostatik, ıslak ve toplam gecikme olmak üzere ayrı ayrı ele alınmıştır. Hidrostatik mapping fonksiyonlarının karşılaştırılmasıyla (1) kuru gazların gecikme tahmininde yol açtığı hatanın 70° 'nin altındaki zenit açıları için bir santimetrenin altında olduğu, (2) Hopfield modeline dayalı mapping fonksiyonlarının artan zenit açısıyla birlikte gerçektekenden daha büyük bir gecikme değeri tahmin etme eğiliminde oldukları, (3) Chao hidrostatik teriminin 70° - 80° zenit açılarında biraz daha iyi, ancak daha büyük açılarda diğerlerine benzer sonuç vermekte olduğunu, (4) Saastamoinen modelinin 80° zenit açısına dek 1-2 cm yakınlıkta sonuçlar verdiğini, ancak zenit açısı 80° 'nin üzerine çıktığında farkların hızla ve büyük oranda arttığını, (5) Cfa2.2. mapping fonksiyonunun hidrostatik gecikme açısından, 80° 'ye dek bir santimetrenin altında, 85° 'ye dek ise 2-3 cm dolayında bir hata verdiğini ve bunun ulaşılan en küçük hata değeri olduğunu ortaya koydular. Islak mapping fonksiyonlarının analizi ile (1) tüm fonksiyonların ışın izleme yöntemi ile karşılaştırıldığında, 80° 'ye kadar bir santimetrenin altında, 85° 'ye dek ise 1-2 cm düzeyinde uyumlu sonuç verdiğini ve bunun da zenit gecikmesi tahmin hatasının göstergesi olduğunu, (2) değiştirilmiş Hopfield fonksiyonunun, ıslak mapping fonksiyonları ile ışın izleme yöntemi uygulanarak elde edilen sonuçlara en yakın sonucu verdiğini bulguladılar. Toplam

zenit gecikmesini modelleyen mapping fonksiyonları için yaptıkları değerlendirmede (1) standart Saastamoinen modelinin 80° 'den daha büyük zenit açılarında kötü sonuç verdiğini, (2) Marini&Murray fonksiyonunun Hopfield modeline dayalı modellerle benzer sonuçlar verdiğini, (3) Hopfield modeline dayalı Black&Eisner fonksiyonunun 80° 'nin üzerindeki zenit açılarında ışın izleme yöntemi ile elde edilenlere göre en uyumlu sonucu verdikleri sonucuna ulaştılar. Sonuç olarak, Janes ve diğ. (1991), Saastamoinen modelinin CfA2.2 hidrostatik ve değiştirilmiş Hopfield ıslak mapping fonksiyonları ile kullanılmasını önermişlerdir.

MacMillan ve Ma (1994) VLBI verilerini kullanarak farklı mapping fonksiyonlarını analiz etmişlerdir. Bu değerlendirmede deneysel amaçlı üç veri setini kullanmışlardır. İlk deney Kuzey Amerika'da dört yıl boyunca her ay gerçekleştirilmiştir. Ölçme programları mümkün olan en küçük gözlem açılarını içine alacak şekilde yaklaşık azimutal simetrik gökyüzünü kaplamaktadır. İkinci ölçme kampanyası 17 gün boyunca gerçekleştirilen 12 deneyden oluşmaktadır. Bu deneyler, olası uzun dönemli mevsimsel (atmosferik) ya da diğer sistematik hataları azaltarak kısa dönemli jeodezik presizyon ölçütü sağlamıştır. Üçüncü deney Avrupa ve Kuzey Amerika'da bulunan 5 istasyonun oluşturduğu bir ağda gerçekleştirilmiştir. Analiz edilen mapping fonksiyonları, MTT fonksiyonu olarak da bilinen Herring fonksiyonu (Herring, 1992), Chao (Spilker, 1996b; Niell, 1996) ve CfA2.2 (Davis ve diğ., 1985) fonksiyonlarıdır. Deneysel verilerin değerlendirilmesiyle, baz kenarı çözümleri farklı hidrostatik ve ıslak mapping fonksiyonu kombinasyonları kullanılarak karşılaştırılmıştır. Çalışmada, sistematik hatalar (ortalama uzunluk hataları) ve rastlantsal uzunluk hataları araştırılmıştır. Mapping fonksiyonu ve eğim açısı seçiminin bulunan uzunluk değişim oranını etkilediği ve Cfa2.2/değiştirilmiş Hopfield ya da MTT mapping fonksiyonlarının kombinasyonu kullanılarak elde edilen uzunluk oranları arasında bir fark olmadığı ($0.1-0.2$ mm/yıl) sonucuna ulaşmışlardır.

Mendes ve Langley (1994) çeşitli mapping fonksiyonları üzerinde yaptıkları analiz ile, en iyi performansın sürekli kesir formundaki Marini fonksiyonuna dayalı mapping fonksiyonları, Saastamoinen modeli ve Lanyi mapping fonksiyonları kullanıldığında elde edildiği sonucunu çıkartmışlardır. Lanyi ve Cfa2.2 fonksiyonlarının ışın izleme tekniği ile karşılaştırılmaları sonucunda bazı mevsime

ve/veya enleme bağımlılık taşıdıkları bulgulanmış, bu farklılığın da tropopoz yüksekliği ve sıcaklığın yüksekliğe bağlı değişimi için nominal değer kullanımından kaynaklanabileceği ifade edilmiştir. Sonuçta, Mendes ve Langley; Lanyi, Herring, Ifadis ya da Niell mapping fonksiyonlarının kullanımını tavsiye etmişlerdir.

Niell (1996) yaptığı çalışmada hidrostatik ve ıslak mapping fonksiyonları geliştirmiş ve bu fonksiyonları CfA2.2, Ifadis ve Herring fonksiyonları ile karşılaştırmıştır. Tüm mapping fonksiyonları VLBI verileri üzerinde uygulanmış ve elde edilen sonuçlar radyoson profilleri ile karşılaştırılmıştır. Niell değerlendirdiği bütün fonksiyonların doğruluklarının yüzey sıcaklığına bağlı olarak sınırlı olduğunu ve bunun sınır katmanında (yüzeyden yaklaşık 2000 m yüksekliğe kadar) üst katmanlara göre daha çok ısı değişiminin söz konusu olmasıyla ilişkili olan üç soruna yol açtığını ortaya koydu. Bu durumun nedenleri (1) yüzey sıcaklığındaki günlük değişimlerin mapping fonksiyonlarıyla hesaplanandan çok daha küçük değişimlere neden olması, (2) üst atmosferin, hesaplanan mapping fonksiyonlarında yapay büyük mevsimsel değişimlere yol açacak derecede (kutba yakın kuzey enlemlerinde inversiyon tabakası altındaki çok düşük sıcaklıklar buna örnek olarak verilebilir) değişmesi ve (3) sıcak kış günleri için, uygulanan mapping fonksiyonları ile hesaplanan gecikmenin, gerçektekinden yüksekliğe bağlı değişim oranları ve tropopoz yükseklikleri nedeniyle oldukça farklı olmasına karşın, soğuk kış günleri için signifikant olarak farklı olmamasıdır (Niell, 1996). Hidrostatik mapping fonksiyonları ve radyoson profillerinin karşılaştırılmasıyla, Niell mapping fonksiyonunun en küçük sapma değerine sahip olduğu sonucuna ulaşan Niell, ıslak mapping fonksiyonları arasında ise Herring ve Ifadis fonksiyonlarının en iyi sonucu verdiğini, ancak elde edilen değerlerin standart sapmasının çok yüksek olması nedeniyle ıslak atmosferdeki gerçek değişimleri yansıtmadıklarını vurgulamıştır. Toplam gecikme mapping fonksiyonları arasında yaptığı karşılaştırma sonucunda ise Lanyi mapping fonksiyonunun, diğer üç fonksiyonla karşılaştırdığında radyoson değerlerine göre daha büyük sapma gösterdiğini ortaya koymuştur.

Bisnath ve diğ. (1997) çeşitli mapping fonksiyonları ile elde edilen sonuçları yaygın olarak toplanmış radyoson ve uçuş verileri ile karşılaştırmışlardır. Buna göre (1) 30°'nin üzerinde eğim açıları için tüm fonksiyonların 5 mm'nin altında bir doğrulukla gecikmeyi modelledikleri, (2) hemen hemen bütün fonksiyonların 15°'nin

üzerindeki eğim açıları için bir santimetrenin altında doğruluk sağladıkları (3) 10^0 'nin altındaki eğim açıları için sadece bir kaç fonksiyonun uydu jeodezisi teknikleri açısından gereksinim duyulan yeterli doğruluğu sağladıkları sonucunu elde etmişlerdir. 10^0 'nin üstündeki eğim açıları için Niell, Herring ve Ifadis fonksiyonlarının oldukça iyi sonuç verdiğini, bunun yanı sıra Baby, Lanyi ve Saastamoinen fonksiyonlarının da iyi bir performans sergilediğini vurguladılar. Bisnath ve diğ. de, Lanyi ve CfA2.2. fonksiyonlarının ışın izleme tekniği ile karşılaştırılmaları sonucunda bazı mevsime ve/veya enleme bağımlılık taşıdıklarını ortaya koydular. Radyoson verileriyle yaptıkları karşılaştırmaların sonuçları, 10^0 'nin altındaki eğim açılarında Niell, Herring ve Ifadis fonksiyonlarının iyi sonuç verdiği sonucuna ulaşan Bisnath ve diğ., yüksek presizyonlu çalışmalar için Lanyi, Herring, Ifadis ya da Niell fonksiyonlarının kullanılmasını önerdiler (Bisnath ve diğ., 1997).

Mendes ve Langley (1998) yaptıkları çalışmada, parklı parametre seçimi ile sıcaklık profillerine dayalı CfA2.2, Lanyi, ve UNSW931 mapping fonksiyonlarının performanslarını değerlendirdiler. Bu çalışmada, bir yıllık radyoson profili verilerine dayalı ışın izlerini kullandılar. Sonuçta nominal parametre değerlerinin, istasyon enlemi ile büyük bir korelasyona sahip mapping fonksiyonlarının performansında signifikant hatalara yol açtığını saptadılar. Bu nedenle, kendi kurdukları modeller aracılığıyla ürettikleri tropopoz yüksekliği ve yüksekliğe bağlı değişim oranlarını uyguladılar. Daha önce de vurgulandığı gibi, yaptıkları değerlendirme sonucunda CfA2.2 ve UNSW931 fonksiyonları arasında yüksek bir korelasyon değeri olduğu sonucuna varan Mendes ve Langley, bunun her iki fonksiyonda da aynı parametrelerin kullanılmış olmasından kaynaklanmış olabileceğini ifade ettiler. Yaptıkları analize göre, bu fonksiyonlar nominal değerlerin kullanımı durumunda daha kötü sonuçlar vermektedir ve bu durum da, özellikle de orta ve yüksek enlemler için, mevsimsel bağımlılığı yansıtmaktadır. Aynı değerlendirme, düşük enlemler bölgelerinde çok iyi sonuç verdiği vurgulanan Lanyi mapping fonksiyonu için de yapılmaktadır.

Mapping fonksiyonu değerlendirmeleri ile sağlanan en önemli gelişme, bu fonksiyonların düşük eğim açılı uydu jeodezisi ölçülerinin değerlendirmeye alınmaları olanağını sağlamalarıdır. Düşük eğim açılı ölçülerin kullanımı, sadece zenit troposferik gecikme düzeltmeleri ile istasyon yükseklikleri arasındaki

korelasyonu azaltmakla kalmamakta, aynı zamanda baz kenarı çözümlerinin tekrar edilebilirliklerini iyileştirmektedir. Bu nedenle yüksek presizyonlu jeodezik uygulamalar açısından taşıdıkları önem yadsınamaz.

Bu bölümde özetle ele alınan troposferik gecikme modelleri ve aralarındaki karşılaştırmalar, Lanyi, Ifadis, Herring ve Niell tarafından geliştirilen fonksiyonların jeodezik uygulamalar için tatmin edici sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu sonuç, Uluslararası Dünya Dönme Servisi (International Earth Rotation Service - IERS) tarafından da, radyo tekniklerinde kullanılan troposferik modellerin ele alındığı bir konferansta gündeme getirilmiştir. Buna göre, atmosferdeki düşey sıcaklık dağılımı konusunda yeterli bilgiye sahip olduğu durumlarda Lanyi mapping fonksiyonunun, aksi durumdaysa Ifadis, Herring ya da Niell mapping fonksiyonlarından herhangi birinin kullanılması önerilmektedir (McCarthy, 1996). Sözü edilen mapping fonksiyonları bilimsel değerlendirme yazılımlarına da uyarlanmaktadır. Örneğin, Bernese yazılımı ile yapılan değerlendirmelerde mapping fonksiyonu olarak Niell mapping fonksiyonunun kullanılması önerilmektedir (Hugentobler ve diğ., 2001).

Geliştirilen troposferik modeller ve mapping fonksiyonları özellikle de orta büyüklükteki ve uzun bazlar için önemlidir. Kısa mesafeli bazlarda bütün modellerle özdeş sonuçlar elde edilmektedir.

5. GPS ÖLÇÜLERİNİN STOKASTİK ÖZELLİKLERİ

5.1 Giriş

Yüksek presizyonlu tüm jeodezik uygulamalardaki GPS veri değerlendirme algoritmalarında taşıyıcı faz ölçüleri kullanılmaktadır. Bu algoritmalar genellikle en küçük kareler yöntemine dayanmaktadır. Optimal GPS değerlendirmesinde iki aşama söz konusudur, ilki fonksiyonel modelin oluşturulması, ikincisi ise ilgili stokastik modelin kurulmasıdır. Fonksiyonel model GPS ölçüleri ve bilinmeyen parametreler arasındaki matematiksel ilişkileri tanımlar. Stokastik model ise GPS ölçülerinin istatistiksel özelliklerini ortaya koyar (Leick, 1995).

Fonksiyonel model kod ya da taşıyıcı faz ölçüleri ile atmosferik gecikmeler, saat hataları ve taşıyıcı faz tamsayı çevrim belirsizlikleri gibi bilinmeyen parametreler arasındaki ilişki üzerine kuruludur. Rastlantısal noise hatası hem kod, hem de taşıyıcı faz ölçülerini etkilediği için, hatalardan etkilenmiş ölçülerden arzu edilen sonucun elde edilebilmesi için dikkate alınmalıdır (Tiberius ve diğ., 1999). Bu nedenle, değerlendirmeyi bu ilke çerçevesinde gerçekleştirebilmek için noise karakteristiklerini tanımlayan bir stokastik modelin kullanılması; bunun içinse GPS ölçüleri için uygun değerlendirme modellerinin ve ağırlık algoritmalarının tanımlanması gerekir.

Şimdiye dek GPS üzerine yapılan çalışmaların pek çoğu veri değerlendirme modelleri üzerinedir. Bu bağlamda mevcut veri değerlendirme modellerinin 1980'li yıllardan bugüne temel olarak aynı olduğunu söyleyebiliriz. Fonksiyonel modelin oluşturulması sürecinde önceki bölümde ele alınan veri fark teknikleri bir çok hata kaynağını ortadan kaldırmak için yaygın olarak kullanılır. Ancak fark tekniğinin uygulanması sonrasında GPS ölçülerindeki kimi modellenmemiş hatalar varlığını koruyabilir.

Veri değerlendirme algoritmaları ile karşılaştırdığımızda stokastik modeller üzerinde çok daha az çaba harcadığını söyleyebiliriz. Geleneksel olarak jeodezik uygulamaların çoğunda GPS taşıyıcı faz ölçüleri eşit ağırlıklı olarak değerlendirilir. Ancak yüksek presizyonlu çalışmalarda ortaya çıkan daha yüksek doğruluk gereksinimi araştırmacıları GPS verileri için uygun stokastik model üretimi arayışına yöneltmiştir. Uygun ağırlık algoritmalarının kullanılmasındaki ana amaç GPS taşıyıcı faz ölçüleri üzerinde etkili olan troposferik gecikme, nokta konumuna bağımlı olan multipath ve sinyal difraksiyonu etkilerinin minimize edilmesidir.

Bir ağırlık matrisi içerisinde toplanmış ölçü ağırlıkları, her bir ölçünün elde edilen tüm çözüme ne kadar katkıda bulunduğu tanımlanmasına olanak verir. Örneğin noise etkisinden daha az etkilenmiş olan ölçülere daha büyük ağırlık verilmesi, daha çok etkilenmiş ölçülere ise daha düşük ağırlık verilmesi akla uygun olacaktır. (Teunissen ve diğ., 1998). Ağırlıkların seçimi, ağırlık matrisi ölçülerin varyans kovaryans matrisinin tersine eşit olduğunda optimaldir. Bu durumda ağırlıkların birbirleri arasındaki denge, hesaplanan çözüme en iyi olası presizyonu sağlayacak şekilde kurulur. Varyans kovaryans matrisini yeterli düzeyde ifade edebilmek için gerçek verilerin stokastik özelliklerinin bilinmesi gereklidir. (Tiberius, 1999).

Son yıllarda bir çok araştırmacı GPS verilerinin değerlendirilmesi açısından stokastik modellerin önemine dikkat çekmişlerdir (Barnes ve Cross, 1998; Hartinger ve Brunner, 1998a; Hartinger ve Brunner, 1998b; Wang ve diğ., 1998; Lau ve Mok, 1999; Tiberius ve Konselaar, 2000). Yürütülen çalışmaların pek çoğunda sinyal kalite ölçütlerine göre üretilmiş stokastik modeller GPS verileri üzerinde uygulanmışlardır.

Bu bölümde GPS taşıyıcı faz ölçüleri için sinyal kalitesi ölçütleri kısaca açıklanmakta ve sinyal kalitesine dayalı olan ve bu çalışmada da uygulanan bazı stokastik modeller üzerinde durulmaktadır.

5.2 GPS Sinyal Kalitesi Ölçütleri

GPS güvenilir bir sistem olmakla birlikte, daha önce de vurgulandığı gibi yüksek doğruluk gerektiren jeodezik uygulamalarında GPS ile elde edilen sonuçların doğruluğu ağırlıklı olarak multipath ve sinyal difraksiyonu etkisi nedeniyle düşüktür (Elosegui ve diğ., 1995). Multipath etkisine ilişkin bilgiler Bölüm 3'te verilmiştir. Noise etkisinin belli başlı bileşenlerinden olan sinyal difraksiyonu etkisi GPS uydusu ile anten arasında bir engel olduğunda meydana gelir. Çalı ve ağaç gibi engeller nedeniyle gerçekleşen sinyal gücünün zayıflaması ve yayılma etkileri, sinyal difraksiyonunun ana kaynaklarıdır (Harteringer ve Brunner, 1999). Uydudan alıcıya yollanan sinyalin bir doğru izleyerek alıcıya ulaştığı şeklindeki varsayımın çelişen sinyal difraksiyonu etkisi uzunluk belirlemede hataya neden olur ve böylece GPS ile konum belirleme doğruluğunu azaltır. Bu durum da, alıcı tarafından kaydedilen sinyalin kalitesinin stokastik modeller açısından ne kadar önemli olduğunu ortaya koymaktadır.

Bir GPS sinyalinin temel kalite ölçütü gücüdür. Langley (1997a) ile Hartinger ve Brunner (1999) multipath ya da sinyal distorsiyonu ile sinyal-noise oranı (SNR) ve taşıyıcı-noise güç yoğunluk oranı (C/N_0) arasındaki ilişkileri tanımlamışlardır. Bu çalışmalarda da multipath ve sinyal zayıflığı etkilerinin sinyal kalite ölçütlerine bağlı ağırlıklandırma algoritmaları ile azaltılabileceği vurgulanmıştır.

Daha önce de belirtildiği gibi, her GPS sinyali bir taşıyıcı, bir PRN geniş spektrum kodu ve bir çiftli (binary) veri mesajı olmak üzere üç bileşenden oluşur. Taşıyıcı kodun yanı sıra çiftli faz kayıklığı ayarı (Binary Phase Shift Keying – BPSK) ile modüle edilmiştir. Bir GPS alıcısı kod fazlarını otokorelasyon fonksiyonunun zirvesini izleyerek desimetre mertebesinde hassasiyetle ölçebilir. Sinyalin geniş spektrumlu doğası, C/A kodu için yaklaşık 43 dB, P kodu içinse yaklaşık 53 dB olan enterferans etkisine karşı bir değerlendirme avantajı sağlar.

GPS sinyallerinin güç düzeyleri genellikle 1 vatlık güce göre desibel (dBw) olarak tanımlanır. Yeryüzündeki kullanıcılar için GPS sinyallerinin elde edilen minimum gücü, L_1 frekansı için -160 dBw ve L_2 frekansı için -166 dBw dolayındadır (NAVSTAR GPS, 1995). Bu sinyal gücü değerleri alıcı noise düzeyinin oldukça altındadır. Kullanılan

antenin alım modeli (antenna gain pattern) zenit doğrultusunda maksimum, 5° ya da daha düşük eğim açısı söz konusu olduğunda ise minimumdur. Genel olarak alıcı tarafından kaydedilen sinyal düzeylerinin C/A ve P kod bileşenleri açısından L₁ frekans kanalı için sırasıyla -153.0 dBw ve -155.5 dBw değerlerini aşmamları beklenir. L₂ frekans kanalı için ise her iki kod türü için -158.0 dBw değerinin aşılmaması beklenir (Ward, 1996). Uydulardan yayımlanan GPS sinyallerinin gücü ise +19.7 dBw (P kod L₂), +23.8 dBw (P kod L₂) ve +26.8 dBw (C/A kod L₁) dolayındadır. Uydudan yayımlanan sinyal antene ulaşana dek zayıflar ve nihayetinde noise düzeyine yakın bir güce sahipken alıcı tarafından kaydedilir. Bu güç kaybı büyük oranda türbülans etkisinden kaynaklanan sinyal dampening ve noise etmenlerinden kaynaklanmaktadır. Bir sinyalin noise etkisinden ayırt edilebildiği en düşük olası güç değeri 204 dBw-Hz'dir.

Bu bölümde ağırlıklandırma algoritmalarında kullanılan en çok bilinen sinyal kalitesi ölçütleri olan sinyal-noise oranı (SNR) ve taşıyıcı-noise güç yoğunluğu oranı (C/N₀) ele alınacaktır.

5.2.1 Sinyal-noise oranı

Sinyal-noise oranı, bir noktada arzu edilen sinyal genliğinin noise sinyal genliğine oranıdır. Genellikle bir GPS ölçüsünü bozan noise düzeyini ifade eden bir ölçüt olarak kullanılan SNR, desibel (dB) biriminde ve impulse noise zirve noktası ve rastlantısal noise değerlerinin karekökleri açısından ifade edilir. SNR. Bu değer GPS sinyalinin gücü ile karşılaştırılabilir. Bir alıcıya bağlı anten ve önyükselteç birimleri de belli bir miktar noise üretirler. Alınan bir sinyalin gücünün (S) noise miktarına (N) oranı bir güç ölçütü olarak değerlendirilir. SNR ya da bazı referanslarda geçtiği şekliyle S/R aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\frac{S}{N} = \frac{P_S}{P_N} \quad (5.1)$$

Burada P_S vat biriminde sinyal gücü ve P_N yine vat biriminde noise gücüdür. Eşitlikten de açıkça anlaşılacağı gibi SNR değeri büyüdükçe sinyal gücü de artmaktadır.

SNR ölçmeleri genellikle, bir sinyalin modüle edilmeksizin doğrudan sayısal formda transfer edildiği temel bant (baseband) içerisinde yer alan sinyaller üzerinde yapılır. Radyo frekansı ve orta düzeydeki frekanslarında (RF ve IF) sinyal düzeyi çoğunlukla noise düzeyine göre tanımlanır (Langley, 1997a). Örneğin Spilker (1996a) faz noise karesel ortalama hata değeri (σ_ϕ) ile SNR arasındaki ilişkiyi aşağıdaki gibi vermektedir:

$$\sigma_\phi^2 \cong \frac{1}{SNR} \quad (5.2)$$

Tüm GPS alıcıları ana olarak sinyal doğruluğunun (integrity) kontrolü ve sinyal izlemenin sürekliliğini sağlamada bir altlık olarak kullanılan postkorelasyon SNR ölçüsü temin ederler. Çok düşük SNR değerine sahip ölçüler güvenilir kabul edilir ve navigasyon çözümünde kullanılmazlar (Axelrad ve Behre, 1999). SNR genellikle, bir sonraki alt bölümde ele alınacak olan C/N_0 değeri ile temsil edilir.

Bir kalite göstergesi olarak SNR, GPS ölçüleri için stokastik model kurulması amacıyla kullanılabilir. Son yıllarda özellikle de yerleşim alanlarında en büyük hata kaynakları olarak kabul edilen multipath ve sinyal difraksiyonu etkilerini azaltmak için uygun stokastik model üretimi amacıyla SNR verilerine dayalı algoritmalar geliştirilmiştir. Bir çok araştırmacı SNR bilgilerini kullanarak taşıyıcı faz ölçüleri üzerindeki multipath etkisini azaltma amacıyla çalışmalarını sürdürmektedir. (Axelrad ve diğ., 1996; Lau ve Mok, 1999). Bu çalışmalara, Herring (1998) tarafından geliştirilen ve internet üzerinden ücretsiz olarak yayınlanan SNR bilgisine dayalı teknik verilebilir. Spilker ve Natali (1996) bu türden multipath azaltma tekniklerine ilişkin kapsamlı bilgi vermektedir.

5.2.2 Taşıyıcı-noise güç yoğunluk oranı

Taşıyıcı-noise oranı (C/N_0), 1 Hz'lik bant genişliğinde sinyal taşıyıcının güç düzeyinin noise düzeyine oranı olarak tanımlanır. Tanımından da anlaşılacağı gibi, SNR ile karşılaştırıldığında C/N_0 sinyalin güç düzeyini tanımlar ve bu özelliğiyle GPS alıcılarının performans değerlendirmelerinde anahtar parametre durumundadır. C/N_0 alıcı kod uzunluğu ve taşıyıcı faz ölçülerinin presizyonunu doğrudan doğruya etkiler (Langley, 1997a). Jeodezik uygulamalarda kullanılan GPS antenleri zenit doğrultusunda

bir kaç desibel ve çok düşük eğim açılarındaki negatif alım ile (bunun anlamı sinyalin eğim açısına bağlı birlikte değişeceği) kullanılabilir şekilde tasarlanmışlardır (Brunner ve diğ., 1999; Hartinger ve Brunner, 1998). Bu konuda daha ayrıntılı bilgi Langley (1997a) tarafından verilmektedir. Gerçek C/N_0 değerleri multipath ve sinyal difraksiyonu, alıcının anten alım modeli ve daha az oranda olmak üzere uydu iletim düzeyi farklılıkları ve atmosferik etkiler nedeniyle değişim gösterirler. Bir başka ifadeyle, bu etmenler uydu vericisinin gerçek güç çıktısı, uydu ve alıcı arasındaki uzaklığın değişiminden kaynaklanan kayıplar, uydu ve alıcı anten alım modelinde eğim açısına ve alınan sinyallerin azimut açısına bağlı olarak meydana gelen değişimler, önyükselteç, anten kablosu ve alıcıdaki sinyal kayıpları ve görüş alanındaki diğer uydulardan kaynaklı olarak efektif noise değerindeki küçük bir artış şeklinde özetlenebilir (Langley, 1997a). Tipik C/N_0 değeri yaklaşık 45 dB-Hz düzeyindedir. Örneğin, -160 dBw gücündeki bir sinyal 44 dBw-Hz büyüklüğünde bir C/N_0 değerine sahiptir. Örneğin Leica SR399 ve SR9500 alıcıları 32 dB-Hz ve 51 dB-Hz arasında C/N_0 değerine sahip GPS sinyallerini kabul ederler.

Tek bir C/N_0 değeri alınan sinyal kalitesinin bir fonksiyonudur. Örneğin eğer anten yüksek multipath etkisine maruz kalan bir nokta üzerine kurulursa, C/N_0 değeri genellikle beklenen değer civarında bir değişim gösterecektir. Cohen (1996), Langley (1997), Braasch ve Van Dierendonck (1999) tarafından aşağıda verilen ve taşıyıcı faz varyansını C/N_0 değerinin bir fonksiyonu olarak ifade eden eşitlik türetilmiştir:

$$\sigma_{\phi_i}(m) = \sqrt{\frac{B}{c/n_0}} \cdot \frac{\lambda}{2\pi} \quad (5.3)$$

Burada i alt indisi L_1 sinyalini (L_1 ya da L_2), B taşıyıcı izleme lupunun noise bant genişliğini (Hz), λ taşıyıcı dalga boyunu (m) ve c/n_0 $10^{\frac{C/N_0}{10}}$ değerini ifade etmektedir. Bu eşitlik L_1 frekansında 0.2 mm taşıyıcı faz noise değeri, 2 Hz bant genişliği lup ve 45 dB-Hz C/N_0 değeri için nominal değeri vermektedir. Bu hata genel olarak multipath ve sinyal difraksiyonunun ağırlıklı etkisiyle ortaya çıkar ve tipik izleme parametreleri için bir milimetreden daha azdır (Cohen, 1996).

5.3 Olası Ağırlıklandırma Algoritmaları

Mühendislik ölçmelerinde istenilen doğruluğa ulaşabilmek için çift fark (DD) GPS taşıyıcı faz ölçüleri kullanılır. Bu nedenle GPS değerlendirme yazılımlarının bir çoğu DD taşıyıcı faz verilerini kullanarak çalışabilecek şekilde tasarlanmıştır. DD taşıyıcı faz ölçülerinin presizyonu eğim açısına ve sinyal kalitesine bağlı olarak değişim gösterir. Bu olgunun ışığında ağırlıklandırma algoritmaları genellikle sinyal gücünün uydu görüş çizgisinin ufka yaklaştığında azaldığı gerçeğine dayalı olarak geliştirilmiştir. Bu algoritmaların geliştirilmesinde karşılaşılan temel problem, ölçülere ilişkin varyans kovaryans bilgilerinin elde edilmesindeki güçlüktür.

En çok uygulanan ağırlıklandırma modeli GPS istasyonunda kaydedilen uydu eğim açısına bağlı bir fonksiyon şeklindedir. En çok bilinen fonksiyon zenit doğrultusundan uydu eğim açısına doğru sinyal gecikmesini ifade eden troposferik mapping fonksiyonudur. Dördüncü bölümde troposferik mapping fonksiyonları ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Mapping fonksiyonlarının kullanımını belirleyen teori, minimum düzeyde olan troposferik zenit gecikmesinin, ya da bir başka ifadeyle zenit doğrultusundaki gecikmenin, ufka yaklaştıkça artmasıdır. Jin ve de Jong (1996) görüş çizgisi ufka yaklaştıkça troposferik gecikmenin arttığını, buna paralel olarak GPS sinyalinin noise değerinde de bir artış olduğunu ortaya koymuşlardır. Sonuç olarak, sinyal noise değerinin istatistiksel varyans değerinin troposferik mapping fonksiyonunun karesi ile orantılı olduğu varsayılr (Collins ve Langley, 1999). Troposferik gecikme etkisinin modellenmesi için yaygın olarak kullanılan troposferik mapping fonksiyonları GPS ölçülerinin ağırlıklandırılması için potansiyel bir araç olabilirler. Bu türden eğim açısına dayalı ağırlık fonksiyonlarına bir örnek olarak $1/\sin \epsilon$ ağırlık fonksiyonu verilebilir. Bu modelde, basitçe uydu eğim açısı ile sinyal kalitesi arasındaki ilişki göz önünde bulundurulur. Eğim açısının kosekant değeri kullanılarak oluşturulan ağırlık fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$w = \frac{1}{\sin(\epsilon)} \quad (5.4)$$

Burada ε uydü eğim açıdır. Bu modelde zenit doğrultusunda yapılan ölçü, birim ağırlıklı ölçü olarak kabul edilir. Collins ve Langley (1998) bu stokastik algoritmayı uyguladıkları çalışmalarında koordinat farkları üzerindeki multipath etkisinin önemli oranda azaldığı sonucuna ulaşmışlardır. Rothacher ve diğ. (1998) ise yine eğim açısına bağlı olan aşağıdaki ağırlık fonksiyonunu kullanmışlardır:

$$w = \text{Cos}^2(z) \quad (5.5)$$

Yukarıdaki eşitlikteki z zenit açıdır. Bu fonksiyonun kullanımıyla yapılan değerlendirmelerde, sonuçların tekrar edilebilirliklerinin daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu ağırlık fonksiyonu, Bernese yazılımının son geliştirilen 4.2 versiyonuna da uyarlanmıştır (Hugentobler ve diğ., 2001).

GPS ölçülerinin stokastik modellenmesi için kullanılan ikinci yöntemse, SNR değerlerine dayalı ağırlık fonksiyonlarının kullanımıdır. Bu çalışmanın ikinci uygulama bölümünde, üç IGS noktasında toplanan veriler kullanılarak 5.5 eşitliğinde verilen ağırlık algoritması ile değerlendirme yapılmıştır.

5.3.1 Sigma- ε ağırlık modeli

Ward (1996) milimetre birimindeki taşıyıcı faz varyansını (σ_i^2), C/N_0 değerlerinin bir fonksiyonu olarak veren aşağıdaki formülü oluşturmuştur:

$$\sigma_{\phi_i}^2 = C_i 10^{-(C/N_{0\text{measure}})/10} \quad (5.6)$$

Yukarıdaki eşitliğin kurulmasında taşıyıcı faz varyansları üzerindeki osilatör stabilitesi etkisi ihmal edilebilir olarak kabul edilmiştir. C_i faktörü taşıyıcı lup noise bant genişliği ve L_i dalga boyunu da içeren çevrim²'den mm²'ye dönüşümü sağlayan bir terimden oluşmaktadır. Bu eşitlik, fark alınmaksızın bir istasyondan bir uyduya yapılan orijinal taşıyıcı faz ölçülerinin varyans tahmininde kullanılabilir (Brunner ve diğ., 1999).

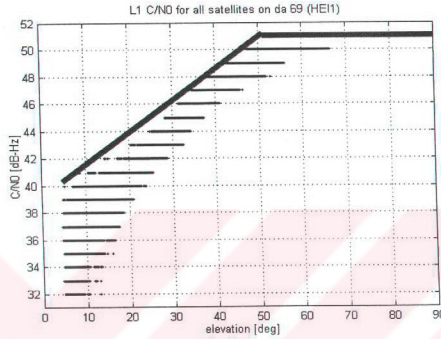
Sigma-ε modeli taşıyıcı faz varyanslarını veren 5.6 eşitliği üzerine kurulmuştur. Bu modelin uygulanmasında, ölçülen C/N_0 değerleri DD taşıyıcı faz ölçülerinin varyanslarının hesabında kullanılır. Her epok için C/N_0 varyansları ile DD varyansları hesaplanır. Bu yaklaşım DD- C/N_0 varyanslarının hesaplanmasını sağlayan varyans dağılım kanununa dayanır. (Brunner ve diğ., 1999). Böylece DD taşıyıcı faz değerleri uygun ağırlıklar alabilir ve aralarındaki matematiksel korelasyonlar yeterli uygunlukta belirlenir.

Bu modelin sağladığı temel avantaj, taşıyıcı faz ölçüsü kalitesini yansıtan C/N_0 değerlerinin kullanımıyla, GPS ölçülerinin artık eşit ağırlıklı olarak değerlendirilmiyor olmasıdır. Ek olarak, GPS sinyallerinin eğim açısına bağlı olarak kalite değişiminin de modellenilebiliyor olması ve böylece herhangi bir matematiksel modelin uygulanmasına gerek duyulmaması da bir diğer avantajdır. Ayrıca yüksek eğim açıları söz konusu olduğunda ortaya çıkabilecek kötü uyu geometrisi sorununun da üstesinden gelinmesine olanak sağlamaktadır. C/N_0 varyans değerleri sıfır fark düzeyinde tahmin edildikleri için Sigma-ε modeli, her bir GPS istasyonundaki farklı anten karakteristiklerine ve çevresel koşullara karşı duyarlıdır (Hartinger ve Brunner, 1998b). Bu çalışmada Sigma-ε ağırlık algoritması GPS DD taşıyıcı faz ölçülerinin değerlendirilmesinde C_i faktörü için Brunner ve diğ. (1999) tarafından önerilen ($1.61 \cdot 10^4 \text{ mm}^2$) değeri kullanılarak uygulanmıştır.

5.3.2 Sigma-Δ ağırlık modeli

Sigma-ε modelinde C/N_0 değerlerinin varyans değerleri, model parametresi C_i aracılığıyla taşıyıcı faz ölçülerinin varyans değerleriyle ilişkilendirilmektedir. Ancak Brunner ve diğ. (1999) tarafından vurgulandığı gibi, taşıyıcı faz ölçülerinin ağırlıklandırılmaları için kurulan bu model sinyal difraksiyonu etkileri karşısında yeteri kadar duyarlı olamayabilmektedir. Ayrıca sinyal difraksiyonundan etkilenen sinyallerin aynı azimut ve eğim açısında kaydedilen “temiz” sinyallere göre daha düşük C/N_0 değerlerine sahip oldukları da ispatlanmıştır. Böylece bu dezavantajın göz önünde bulundurulmasıyla difraksiyona maruz kalan ve iyi olan uyduları birbirlerinden ayırmak için bir şablon (template) uygulanması bir yöntem olarak kullanılabilir. Şablon, uydu

tarafından yayınlanan ve belli türdeki bir GPS anteni ile alınan bir sinyale ait en yüksek C/N_0 ile tanımlanabilir. Bu şekilde şablon, en yüksek C/N_0 değerlerinin birleştirilmesiyle oluşturulur. Bu şablona bir örnek olarak, Şekil 5.1'de Ashtech Dorne Morgolin Choke Ring anteni ile toplanan L_1 ölçülerine ilişkin çizilen bir şablon örneği görülmektedir.



Şekil 5.1: Ölçülen C/N_0 (alt çizgiler) ve C/N_0 şablonu (üst çizgi) (Ashtech Dorne Morgolin Choke Ring anteni)

Şablon C/N_0 değeri ile ölçülen C/N_0 değeri arasındaki fark (Δ) aşağıda verilmektedir:

$$\Delta = \left| C/N_{0_{\text{template}}} - C/N_{0_{\text{measured}}} \right| \quad (5.7)$$

Eğer sinyal difraksiyon etkisine maruz kalmamışsa ya da sinyal atmosferde yol aldığı sürece zayıflamamışsa Δ değeri sıfır olacaktır. Çünkü bu durumda ölçülen $C/N_{0_{\text{measured}}}$ değeri şablon $C/N_{0_{\text{template}}}$ değerine eşit olacaktır. Ayrıca sinyal difraksiyonu söz konusu olduğunda ölçülen $C/N_{0_{\text{measured}}}$ değerinin ağırlığının daha da azaltılması gerektiği açıktır. Sonuç olarak taşıyıcı faz ölçülerinin nihai C/N_0 değeri aşağıda verilen şekilde ifade edilebilir:

$$C/N_{0\sigma} = C/N_{0\text{measured}} - \alpha \cdot \Delta \quad (5.8)$$

Burada α difraksiyondan etkilenmiş taşıyıcı faz ölçülerinin ağırlıklarının azaltılması için kullanılan bir faktördür. Yukarıdaki eşitliğin kullanımıyla nihai taşıyıcı faz varyans eşitliği aşağıdaki gibi oluşturulabilir:

$$\sigma_{\phi_i}^2 = C_i \cdot \frac{1}{10^{(C/N_{0\text{measured}} - \alpha \cdot \Delta)/10}} = C_i \cdot 10^{-(C/N_{0\text{measured}} - \alpha \cdot \Delta)/10} \quad (5.9)$$

Bu durumda, sinyal kalitesinin iyi olması durumunda Sigma- ϵ ve Sigma- Δ stokastik modelleri tamamen aynı sonucu verecektir. 5.7 eşitliğinin kullanımının yol açtığı en önemli dezavantaj Δ değerinin kullanılmayacağı, ya da bir başka ifadeyle sıfır kabul edileceği bir güvenlik kuşağının tanımlanmamış olmasıdır. Bu olumsuzluğun üstesinden gelmek için Δ değeri aşağıdaki gibi alınabilir:

$$\Delta = C/N_{0\text{TemplateMinimum}} - C/N_{0\text{measured}} \quad (5.10)$$

Yukarıdaki eşitlikte oluşturulan şablondaki maksimum C/N_0 değeri yerine minimum değer kullanılır. Bu durumda Δ değerinin negatif olması durumunda taşıyıcı faz ölçüsünün iyi kaliteli olduğu, aksi durumda ise difraksiyon etkisine maruz kaldığı düşünülür. Sonuçta modifiye edilen eşitlik aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

$$\sigma_{\phi_{\Delta}}^2 = C_i \cdot 10^{-(C/N_{0\text{measured}} - (\alpha-1)\Delta)/10} \quad (5.11)$$

İyi sinyal için ($\Delta \leq 0$) α değeri 1 alınmakta, böylece taşıyıcı faz 5.6 eşitliği ile verilen Sigma- ϵ modeline göre ağırlıklandırılmaktadır. Eğer sinyal kalitesi kötü ise ($\Delta > 0$), α değeri 2 alınır ve böylece bu sinyalin ağırlığı azaltılır. 5.11 eşitliğinin uygulanmasının sağladığı temel avantaj 5.9 eşitliğinde olduğu gibi bir güvenlik kuşağına gereksinim duyulmamasıdır. 5.10 eşitliğinde tanımlanan Δ değeri ile ağırlık azaltımı 5.10 eşitliğinin uygulanmasına göre daha düşüktür.

Bu çalışmanın kısa baz kenarlarının çözüldüğü birinci uygulama bölümünde taşıyıcı faz varyanslarının hesaplanmasında 5.11 eşitliği ile verilen modifiye edilmiş Sigma- Δ modeli uygulanmıştır. Ayrıca toplanan ölçmelerin bir bölümünde istasyonlardan birine kurulan anten düşey nakil taşıyıcısı (translation stage) kullanımı ile düşey harekete maruz bırakılmış, yapay olarak yaratılan düşey konum değişimlerinin koordinat çözümleri üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Uygulamalar ve sonuçları bir sonraki bölümde ele alınmaktadır.

6. SAYISAL UYGULAMA

Çalışmanın uygulama bölümünde, ilk olarak kısa baz kenarı çözümlerinde sinyal kalitesine dayalı stokastik modeller, ikinci olarak uzun baz çözümlerinde eğim açısına dayalı stokastik model ile değerlendirme yapılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir.

6.1 Kısa Baz Kenarlarında Uygulama

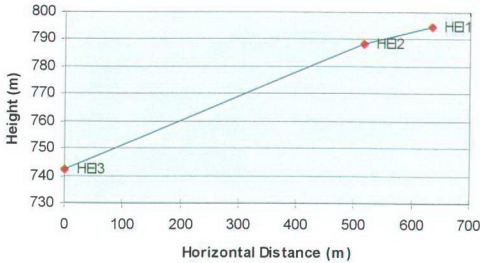
Uygulama bölümünün bu ilk bölümünde amaç, önceki bölümde ele alınan sinyal kalitesine dayalı stokastik modellerin kısa baz kenarı çözümlerinde uygulanması ve yükseklik bileşeni başta olmak üzere GPS ile elde edilen koordinat çözümleri üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Bu amaçla, bu modellerin yapay olarak uygulanmış düşey yöndeki hareketlere karşı olan duyarlılığı da ele alınmıştır.

Araştırma kapsamında, fotoğrafları Şekil 6.1’de verilen 3 noktada GPS ölçmeleri yapılmıştır. Şekilde de görüldüğü gibi rover istasyon HEI2 noktasındaki anten, bilgisayar tarafından kontrol edilen motorlu nakil taşıyıcısı (translation stage) üzerine kurulmuştur. Ölçmeler, özellikle de Uluslararası GPS Servisi (International GPS Service – IGS) istasyonlarında olduğu gibi yüksek presizyonlu ölçmelerde yaygın olarak kullanılan Ashtech Dorne Morgolin Choke Ring antenlerine bağlı üç Leica SR399 GPS alıcısı ile gerçekleştirilmiştir. Antenler yerden yaklaşık 2 metre yükseklikte olacak şekilde alet sehpaları üzerine kurulmuştur.



Şekil 6.1: HEI1 (sol), HEI2 (orta) ve HEI3 (sağ) istasyonları

İlk referans istasyonu HEI1 bir tarla üzerinde yer almaktadır. Bu noktadan yansıtıcı yüzeylere olan uzaklık yaklaşık 300 metre dolayındadır. Dolayısıyla, hem yansıtıcı yüzeylerin uzaklığı, hem de en az 2 metre olan anten yüksekliği nedeniyle, olası multipath etkilerinin sadece yerden yansıyan sinyallerden kaynaklanacağı ve bunun da sonuçları çok düşük frekanslı osilasyonlar ile etkileyeceği beklenmiştir. İkinci referans istasyonu HEI3 de yine bir tarla üzerindedir. Bu istasyonun bulunduğu alanın doğusu ve kuzeyi ormanlık alandır ve bunun sinyal kalitesini etkileyebileceği öngörülebilir. Rover istasyonu HEI2 her iki istasyon arasında yer almaktadır. HEI1'den HEI2'ye olan uzunluk 119.81 metre ve HEI3'ten HEI2'ye olan uzunluk ise 514.19 metredir. Şekil 6.2'de üç GPS istasyonunun birbirlerine göre konumları verilmektedir.



Şekil 6.2: İstasyonların konumsal profilleri

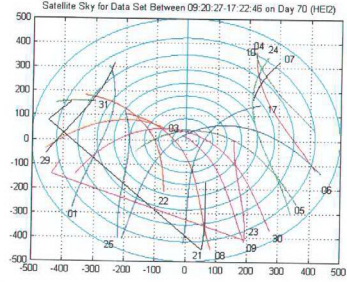
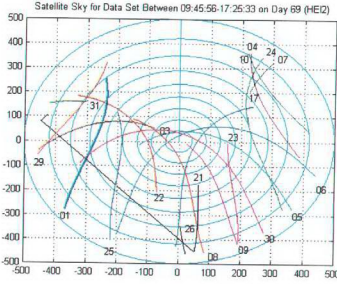
Rover istasyonu HEI2'nin yaklaşık 10 metre batısında bir kulübe bulunmaktadır ve olası multipath etkilerinin bu kulübeden kaynaklanabileceği beklenebilir. 1998 yılında gerçekleştirilen ölçmelerde uygulanan ölçme planı şu şekildedir. 10 Mart tarihinde yapılan ilk oturumda, ölçmelerin bir bölümünde bilgisayarla kontrol edilebilen nakil taşıyıcısı kullanılarak HEI2 noktasında lineer düşey hareket uygulanmıştır. Özellikle de multipath etkisinin tekrar edilirliliğini gözlemlemek için, ertesi gün ikinci oturum ölçmeleri yapılmış, ancak bu kez rover istasyonunda düşey hareket uygulanmamış, ölçüler antenin başlangıçtaki konumunda yapılmıştır. GPS ölçüleri ilk oturumda 09:45:56-17:25:33 UTC arasında, ikinci oturumda ise 09:20:27-17:22:46 UTC arasında gerçekleştirilmiştir.

Ölçmelerde uygulanan ölçme modu “sampling” modudur. Ölçülen verinin her 1/10 saniyede alınan ve daha sonra filtrelenerek 1 saniyelik zaman dilimi için birleştirilen ham uydu verisi olduğu “compacted” ölçme modunun tersine, “sampled” veriler, ölçme öncesi tanımlanan kayıt aralığında toplanır ve herhangi bir filtreleme ya da “smoothing” işlemine tabi tutulmaz. Ölçmeler için minimum eğim açısı 5° ve ölçme aralığı ise 1 saniye olarak uygulanmıştır. Ölçmeler süresince herhangi bir sorunla karşılaşılmamıştır.

6.1.1 Veri analizi

6.1.1.1 Ön değerlendirme

Ön değerlendirmenin ilk aşaması, uydu geometrisinin her iki oturum için değişip değişmediğinin kontrol edilmesinden oluşmaktadır. Bu amaçla, toplanan ölçü verilerinden yararlanılarak gerçek uydu dağılım çizimleri yapılmıştır. Uydu dağılım çizimlerine göre, iki oturumda da her istasyonda uydu görünürlüğü birbirleriyle hemen hemen özdeştir. Ayrıca, ikinci oturum süresince devre dışı bırakılan PRN26 uydusu dışında, uydu geometrisi de değişmemiştir. Şekil 6.3'te HEI2 istasyonundaki uydu dağılımı gösterilmektedir. Diğer istasyonlar için uydu dağılımı da benzer şekildedir.

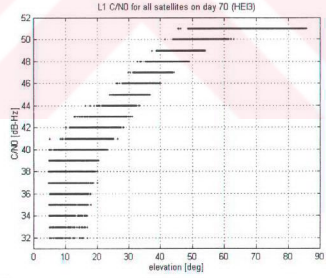
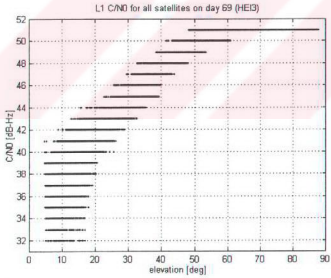
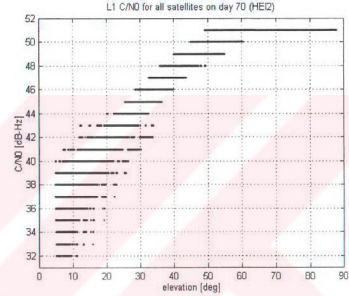
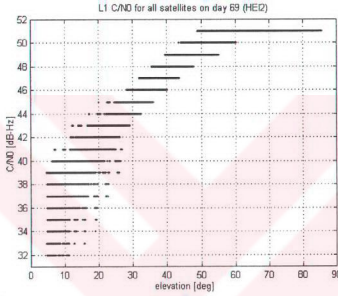
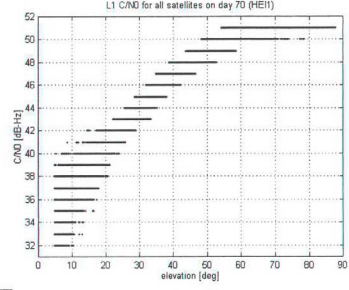
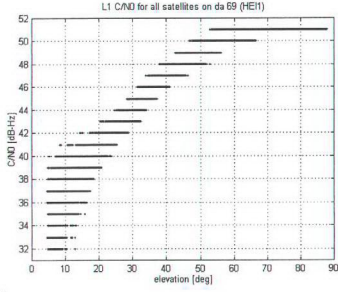


Şekil 6.3: HEI2 istasyonunda birinci (sol) ve ikinci (sağ) oturumdaki uydu dağılımı

Ön değerlendirmenin ikinci aşamasında ise, L_1 ve L_2 ölçüleri için veri dosyalarından C/N_0 değerleri türetilmiştir. Şekil 6.4'te ölçülen L_1 frekansı C/N_0 değerleri gösterilmektedir.

Bu aşama olası sinyal difraksiyonu ya da kötü faz ölçüsü etkilerini gözler önüne sermektedir. Ölçmelerde kullanılan Leica SR 399 alıcıları, 32 dB-Hz ve 51 dB-Hz arasındaki C/N_0 değerine sahip GPS sinyallerini kabul etmektedir. C/N_0 değerlerinin kontrolü sonucunda signifikant bir distorsiyon belirlenmemiştir. Ancak tüm istasyonlar için birinci oturumdaki L_1 fazı C/N_0 değerleri, ikinci oturumdaki değerlerden daha iyidir.

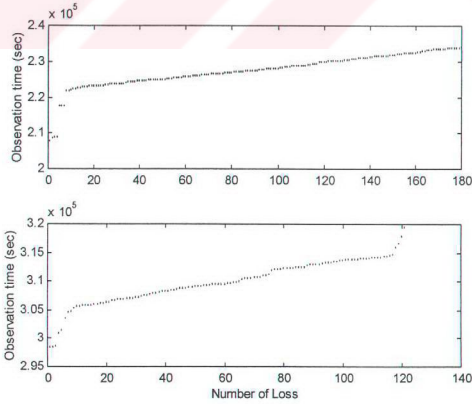
Birbirini takip eden günlerde yapılan iki oturumda, hava koşulları aynı değildi. İlk gün hava karlı ve rüzgarlı idi ve kar fırtınası nedeniyle antenlerin konik yüzeyleri kısmen karla kaplanmıştı. Ancak, ikinci gün ölçmelerin başlamasından itibaren bir kaç saat içerisinde karlar eridi. Bu meteorolojik değişimler alınan sinyallerin kalitesini etkilemiş olabilirler. L_1 fazının tersine, L_2 fazı C/N_0 değerleri tüm istasyonlarda hemen hemen aynıdır. Büyük oranda multipath etkisinden uzak bir yerde bulunmasına karşın, HEI1 noktasındaki C/N_0 değerleri tüm C/N_0 değerleri içerisinde en düşük düzeydedir. Bununla birlikte, sinyal kalitesini olumsuz yönde etkileyebilecek ormanlık bölgenin yakınında yer alan HEI3 noktasındaki C/N_0 değerleri diğerlerinden daha iyidir.



Şekil 6.4: Eğim açalarına göre tüm uyduların $L_1 C/N_0$ değerleri
HEI1 (üst), HEI2 (orta) ve HEI3 (alt)
İlk kolon: ilk oturum (10 Mart)
İkinci kolon: ikinci oturum (11 Mart)

Verilerin ön değerlendirilmesi aşamasında bazı epokların ölçülemediği (loss of lock) saptanmıştır. HEI1 istasyonunda her iki oturumda da ölçülemeyen epok olmamasına karşın, HEI2 istasyonunda ilk oturumda 6, ikinci oturumda 10, HEI3 istasyonunda ise

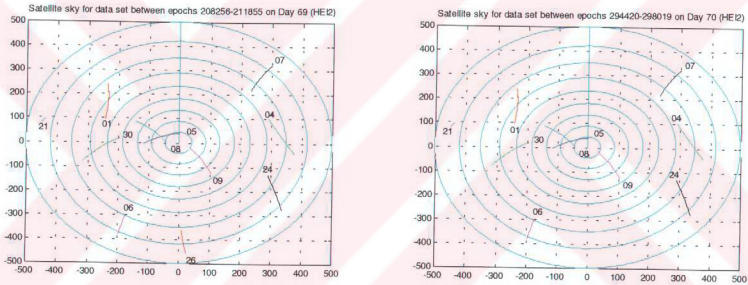
ilk oturumda 180 ve ikinci oturumda 122 epokta ölçüm yapılamamıştır. Bu ölçü kayıpları için görünürde bir neden yoktur. HEI3 istasyonunda çok sayıda kayıp olmasında istasyon çevresindeki engellerin bir rolü olduğu söylenebilir. HEI2 noktasındaki kayıplar ise her iki oturumda da rastlantısaldır. Bununla birlikte, HEI3 istasyonundaki ölçme kayıpları ölçmeler başladıktan iki saat sonra gerçekleşmeye başlamaktadır. Şekil 6.5'te her iki oturum için HEI3 istasyonundaki ölçme kayıpları ölçme zamanına göre gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi, her iki oturumda da ölçme kayıpları ilk iki saatlik ölçme sonunda lineer olarak artmaya başlamaktadır. İkinci oturumun son iki saatlik kesitinde ise ölçme kayıpları azalmaktadır. Bu ölçme kayıplarının nedeni olarak kullanılan ölçme modu verilebilir. "Compacted" modu ile karşılaştırıldığında, "sampled" ölçme modunda veriler tam olarak alıcıya girilen ölçme aralığında kaydedilir. Böylece, eğer bu anda sinyal alınamamışsa, saniyenin onda biri aralıklarla yapılan ölçüleri içeren tüm epok kaybedilmiş olur. "Compacted" modun daha yüksek frekanslı veri kaydı nedeni ile yapılan ölçme, bir ölçünün kaybından etkilenmez. Veri analizinin sayısal tutarsızlıklardan etkilenmemesi için, kayıp olan ölçülerin enterpolasyonla elde edilmesi için şu prosedür izlenmiştir: İlk olarak noise etkisi, zaman serileri üzerinde sonlu impulse tepkisi (Finite Impulse Response – FIR) filtreleme algoritmasının uygulanması ile giderilmiş, daha sonra kayıp olan epoklar spline enterpolasyonu ile belirlenmiştir.



Şekil 6.5: HEI3 istasyonundaki ölçü kayıpları, 1. Oturum (üst), 2. oturum (alt)

6.1.1.2 Sabit verilerin değerlendirilmesi

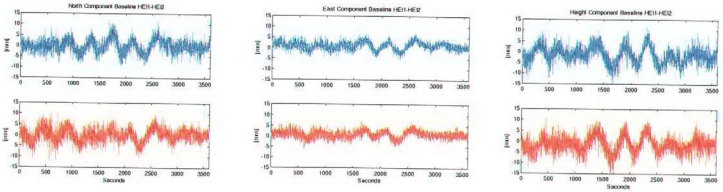
İncelemenin ilk adımı olarak, olası hata kaynaklarını ve noise değerlerini ortaya koymak için her iki oturum için, sadece düşey hareketin uygulanmadığı ilk bir saatlik ölçüler analiz edilmiştir. Bu bağlamda, ilk oturumda saat 9:50:56-10:50:55 arasında, ikinci oturumda ise 9:47:00-10:46:59 arasında yapılan ölçüler, Graz Teknik Üniversitesi'nde, ağırlıklı olarak sabit istasyonlarda yapılan gerçek zamanlı kinematik ölçmelerde kullanılmak amacıyla geliştirilmekte olan Grazia yazılımı ile değerlendirilmiştir. Bu programa önceki bölümde ele alınan stokastik modeller uyarlanmıştır. Bu bölümde HEI1-HEI2 baz kenarı çözümleri sunulmaktadır. HEI2 istasyonundaki uydu dağılımı aşağıda verilen Şekil 6.6'da gösterilmektedir.



Şekil 6.6: HEI2 istasyonundaki uydu dağılımı
İlk kolon: birinci oturum (10 Mart)
İkinci kolon: ikinci oturum (11 Mart)

Her bir epok için koordinat çözümlerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla ölçüler kinematik moda değerlendirilmiş ve böylece her bir noktadaki koordinat değişimleri elde edilmiştir. Taşıyıcı faz ölçülerinin ağırlıklandırılmasında hem Sigma-ε yöntemi hem de Sigma-Δ yöntemi uygulanmıştır. Her iki yöntemle de birbirine çok yakın sonuçlar elde edildiği için sadece Sigma-ε ile elde edilen sonuçlar verilmektedir. Sigma-ε yönteminin kullanılması 5°'lik eğim açısı ve üzerindeki ölçülerin değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Ölçüler üzerindeki bilinen etkilerin araştırılması için, ikinci oturumdaki ölçmeler gerçek zaman

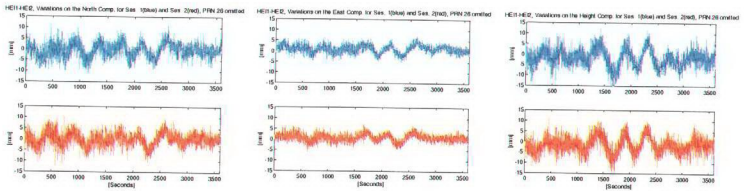
gecikmesi (actual time lag) kadar, yani 236 saniye kaydırılmıştır. Aşağıda verilen Şekil 6.7’de, HEI2 istasyonu için HEI1 referans istasyonuna göre elde edilen koordinat bileşeni çözümleri gösterilmektedir. Şekilde gösterilen sonuçlar, her iki oturumda da tekrarlanan periyodik salınımların varlığını ortaya koymaktadır.



Şekil 6.7: HEI2 istasyonunun kuzey (sol), doğu (orta) ve yükseklik (sağ) bileşenleri, birinci oturum (üst) ve ikinci oturum (alt)

Her bir epokun karşılaştırılması ile elde edilen sonuçlar, koordinat bileşenlerine ait salınımların her iki oturumda da aynı şekilde olduğunu gösteriyor. Ancak, bazı bölümlerde sonuçların tekrar edilebilirliğinin (repeatability) diğer kesitlere göre daha kötü olduğu göze çarpmaktadır. Örneğin ölçmelerin dörtte birlik ilk bölümündeki değişimler, özellikle de kuzey ve yükseklik bileşenleri için özdeş görünmüyor.

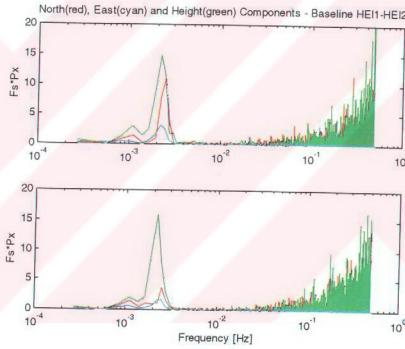
Koordinat çözümlerinin uydü geometrisine bağımlılığı ve ikinci oturum ölçmeleri süresince PRN26 uydusunun manevra operasyonları nedeniyle devre dışı bırakılmış olduğu göz önüne alınarak, uydü geometrisi değişikliğinin etkisini irdelemek için ilk oturum verileri PRN26 uydusu dahil edilmeksizin yeniden değerlendirilmiştir. Bu şekilde elde edilen ve Şekil 6.8’de verilen sonuçlar, koordinat çözümlerinin tekrarlanabilirliğinin daha iyi olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 6.8: HEI2 istasyonunun kuzey (sol), doğu (orta) ve yükseklik (sağ) bileşenleri, birinci oturum (üst) ve ikinci oturum (alt) (PRN 26 ilk oturumda değerlendirme dışında tutulmuştur)

Koordinat bileşenlerinin güç spektral yoğunluk tahminlerine (power spectral density estimates) ilişkin yarı logaritmik ölçek çizimleri Şekil 6.9'da gösterilmektedir. Bu çizimlerde, frekans çarpımı (F_s) ve güç spektral yoğunluk çarpımı (P_x), F_s 'nin yarı logaritmik ölçek değerine karşı gösterilmiştir.

$F_s * P_x$ eğrisinin altında kalan alan, sinyalin varyans değerine olan katkısı ile orantılıdır. Şekilde de görüldüğü gibi, tüm koordinat bileşenleri için yaklaşık olarak 0.001 Hz ($16^{\text{dk}} 40^{\text{sn}}$) ve 0.002 Hz ($8^{\text{dk}} 20^{\text{sn}}$) frekanslarında iki açık periyodik sinyal görülmektedir. Her iki oturumda da aynı kalan yüksekliğe karşılık gelen sinyal dışında, diğer bileşenler için ikinci oturumdaki sinyallerin büyüklükleri daha düşüktür.

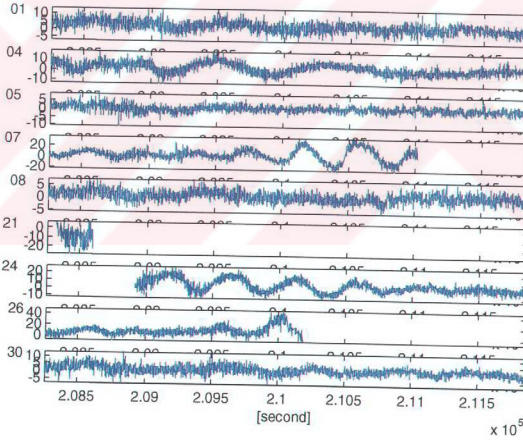


Şekil 6.9: HEI2 istasyonunun koordinatları için spektral güç yoğunlukları
Kuzey (kırmızı), doğu (cyan) ve yükseklik (yeşil),
Birinci oturum (üst), ikinci oturum (alt)

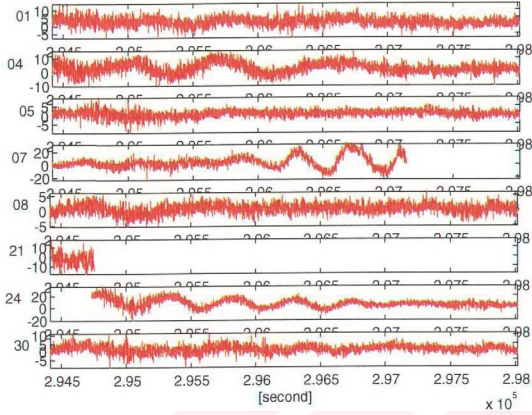
Epok-epok (epoch-to-epoch) koordinatların frekans salınımlarının incelenmesi amacıyla, değerlendirilen 1 saatlik veri seti için DD düzeltmeleri hesaplanmıştır. İlkesel olarak, taşıyıcı faz düzeltmeleri, GPS ölçmelerinin bilinen istasyon koordinatlarının zorlanmasıyla (constraining) hesaplanabilir. Böylece tamsayı çevrim belirsizliği ilk epoktan hesaplanabilir ve taşıyıcı faz hataları ortaya çıkar. Ancak, saat hatalarını elimine edebilmek için hataların farklarının alınmasına yol

açan DD farkları oluşturulmak zorundadır. DD düzeltmeleri, ölçme düzeyinde tüm taşıyıcı fazların farkları alınmış hatalarının etkisini gösterir. 1 saatlik ölçme periyodu için DD düzeltmelerinin hesaplanmasında PRN09 uydusu, 54° ve 82° arasındaki yüksek uydü eğim açısı nedeniyle referans olarak alınmıştır. Bu prosedür her iki oturum için de uygulanmıştır.

Şekil 6.10 ve Şekil 6.11’de, sırasıyla birinci ve ikinci oturum için PRN09 referans uydusuna göre hesaplanan her bir uyduya ait DD düzeltmeleri gösterilmektedir. PRN04, PRN07, PRN24 ve PRN26 uyduları için hesaplanan DD düzeltmelerinde sinüzoidal salınımlar gerçekleşmiştir. Şekil 6.3’teki uydü dağılımında da görüldüğü gibi bu uydular antenlere göre kuzeydoğudan güneydoğuya doğru görünür durumdadır. Bu nedenle bu salınımların olası kaynaklarından biri HEI2 istasyonunun doğusundaki kulübenin alüminyum çatısından yansıyan ve multipath etkisine yol açan sinyaller olarak düşünülebilir.

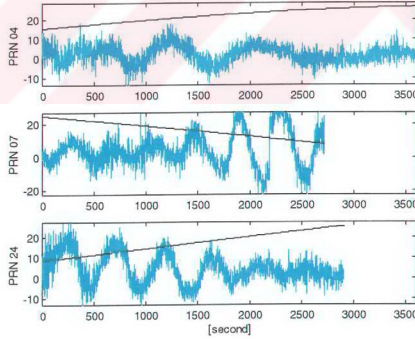


Şekil 6.10: HEI1-HEI2 baz çözümü için DD düzeltmeleri (birinci oturum)



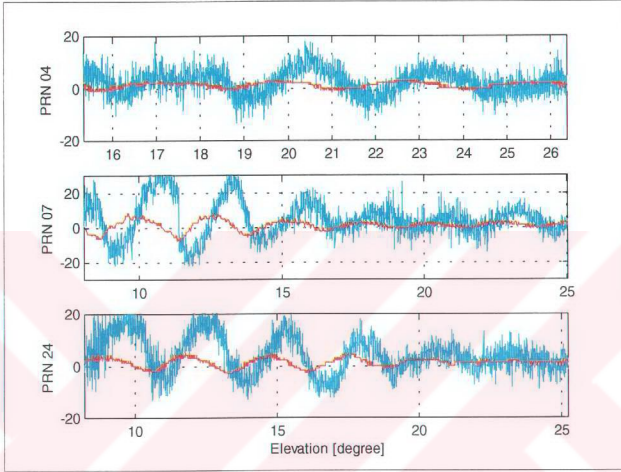
Şekil 6.11: HE11-HE12 baz çözümü için DD düzeltmeleri (ikinci oturum)

Şekil 6.12’de PRN04, PRN07 ve PRN24 uyduları için hesaplanan DD düzeltmeleri ve eğim açıları gösterilmektedir. Şekilde de açıkça görüldüğü gibi, eğim açısı azaldıkça salınımların büyüklüğü artmaktadır.



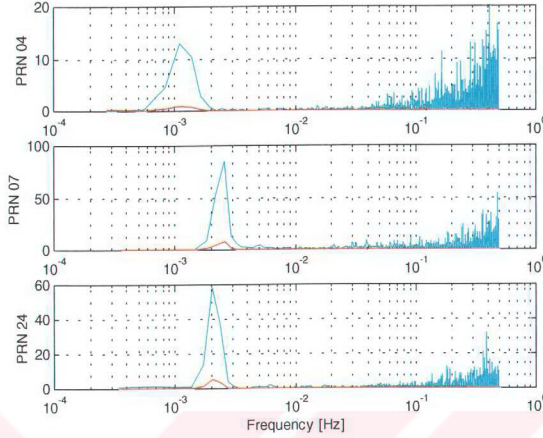
Şekil 6.12: PRN04, PRN07 ve PRN24 için ilk oturumdaki DD düzeltmeleri (mm, cyan) ve eğim açıları (derece, siyah)

DD- C/N_0 değerleri göz önünde bulunduurulduğunda DD düzeltmeleri gibi dşuk frekanslı salınıma sahip oldukları açıkça görülmektedir. Bu durumu ele almak için, hesaplanan C/N_0 farkları ve DD düzeltmeleri uydur eğim açısına göre Şekil 6.13'te grafikte gösterilmiştir. Şekilde, PRN04, PRN07 ve PRN24 uyduları için DD düzeltmeleri ve C/N_0 farkları gösterilmektedir.



Şekil 6.13: DD düzeltmeleri(mm, cyan), C/N_0 farkları (dB-Hz, kırmızı) eğim açısına (derece) karşı

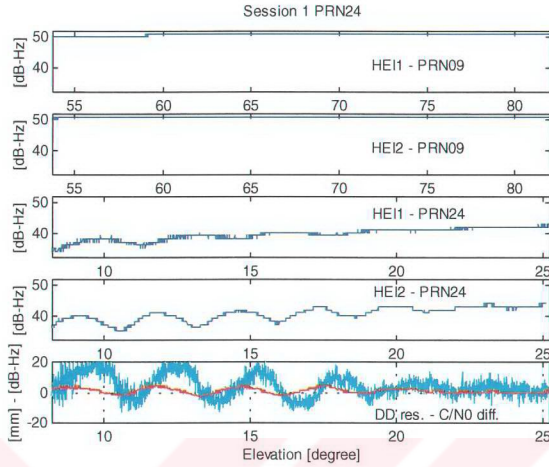
Şekil 6.14'te, PRN04, PRN07 ve PRN24 uyduları için C/N_0 farklarının ve DD düzeltmelerinin yarı logaritmik lekli PSD fonksiyonları gösterilmektedir.



Şekil 6.14: C/N_0 farkları (kırmızı) ve DD düzeltmeleri (cyan) için yarı logaritmik ölçekli PSD fonksiyonu

PRN04 için çizilen grafikte, yaklaşık 0.001 frekansında periyodik bir sinyal görülmektedir. PRN07 ve PRN24 için yaklaşık 0.002 frekansında da daha büyük genlikte bir periyodik sinyal bulunmaktadır. Daha önce de vurgulandığı gibi, koordinat bileşenlerinin epok-epok değerlendirmelerinde de aynı frekans değerlerinde benzer periyodik sıçramalar bulgulanmıştı. Buradan da anlaşıldığı gibi bu olgu, C/N_0 değerleri ile DD düzeltmeleri ya da koordinat çözümleri arasındaki ilişkiyi gözler önüne sermektedir.

Şekil 6.15'te HEI1 ve HEI2 istasyonları için hesaplanan C/N_0 değerleri ve bunlara karşılık gelen DD düzeltme değerleri gösterilmektedir.



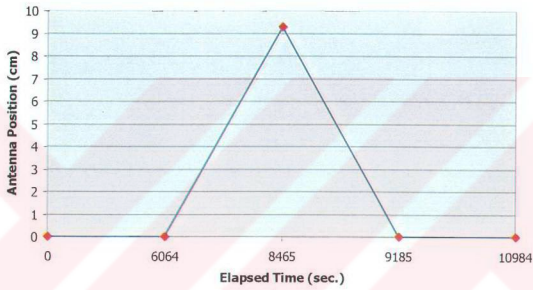
**Şekil 6.15: HEI1 istasyonunda PRN09 için C/N₀ değerleri (iz 1)
HEI2 istasyonunda PRN09 için C/N₀ değerleri (iz 2)
HEI1 istasyonunda PRN24 için C/N₀ değerleri (iz 3)
HEI2 istasyonunda PRN24 için C/N₀ değerleri (iz 4)**

DD düz. ve C/N₀ farkı ($(C/N_{0\ HEI2}^{24} - C/N_{0\ HEI1}^{24}) - (C/N_{0\ HEI2}^{09} - C/N_{0\ HEI1}^{09})$) (iz 5)

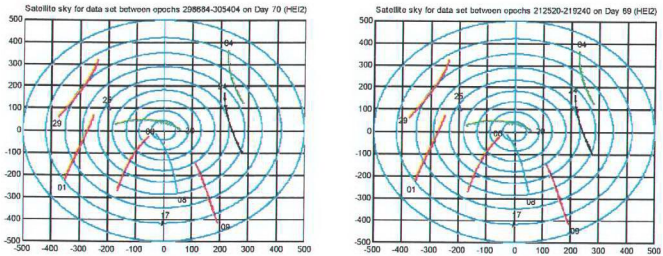
İlk analiz bölümünde elde edilen sonuçlar, birbirini izleyen günlerde elde edilen koordinat çözümlerinin birbirine çok yakın olduklarını, dolayısıyla büyük oranda tekrar edilebilir olduklarını göstermektedir. C/N₀ değerlerine dayalı bir stokastik model olan Sigma-ε ağırlık algoritmasının kullanılmasıyla düşük eğim açılı uydulardan alınan ve difraksiyon etkisine maruz kalması olası ölçüler düşük ağırlıklarla işleme sokulmakta ve böylece uydu geometrisinin yaratabileceği sorunların önüne geçilebilmektedir. Ancak ikinci oturumun yapıldığı gün GPS ana kontrol merkezi tarafından devre dışı bırakılan PRN26 uydusu örneğinin de gösterdiği gibi, uydu geometrisinde meydana gelebilecek en küçük bir değişim bile koordinat çözümlerinin birbirini izleyen günlerde tekrar edilebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu da, sabit izleme istasyonları için oluşturulacak değerlendirme algoritmalarında dikkate alınması gereken bir durum olma özelliği taşıyor.

6.1.1.3 Düşey hareket uygulanan verilerin analizi

Analiz işleminin bu bölümünde ilk oturumda saat 11:02:00-12:54:00 arasında, ikinci oturumda ise saat 10:58:04-12:50:04 arasında yapılan ölçüler değerlendirilmiştir. İncelemede, uygulanan düşey hareketin GPS çözümü üzerindeki etkisi irdelenmektedir. Bu amaçla da, yapay düşey hareketin uygulandığı bölümde toplanan veriler değerlendirilmiştir. Şekil 6.16'da uygulanan düşey ölçmeleri de kapsayan ölçme periyodu, Şekil 6.17'de ise HEI2 istasyonundaki uydu dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 6.16: Uygulanan düşey hareketi de içeren ölçme periyodu



Şekil 6.17: HEI2 istasyonundaki uydu dağılımı
birinci oturum (sol), ikinci oturum (sağ)

Uydu dağılım grafiklerine bakıldığında uydu geometrisinde herhangi bir değişim gözlenmemektedir. HEI2 dışındaki noktalara ilişkin uydu dağılım grafikleri de büyük oranda aynıdır.

6.1.2 Sonuçların Değerlendirilmesi

Epok-epok koordinat çözümlerinin incelenmesi amacıyla bir önceki analizde uygulanan prosedür izlenmiştir. Ölçüler sadece Sigma- ϵ ağırlık modeliyle değil, aynı zamanda Sigma- Δ ve eş-ağırlıklı olarak değerlendirilmiştir. Değerlendirme sonucunda Sigma- ϵ ve Sigma- Δ modelleri ile birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Önceki bölümde de vurgulandığı gibi Sigma- Δ ile değerlendirme, özellikle de sinyal difraksiyonu etkisi olduğunda Sigma- ϵ modeline göre daha iyi sonuç vermektedir. Sinyal difraksiyonu etkisinin az olduğu durumlarda ise her iki modelle özdeş sonuçlar elde edilmektedir. Dolayısıyla, bu ölçü grubunun sinyal difraksiyonu etkisinden çok az oranda etkilendikleri anlaşılmaktadır. Bu nedenle Sigma- ϵ ve eş-ağırlıklı modellerle elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

Koordinat çözümleri ve epok-epok koordinatlarının PSD fonksiyonları Ek-A bölümünde verilmektedir. Şekil A.1, A.2 ve A.3'te sırasıyla 5°, 10° ve 15° eğim açıları ile yapılan değerlendirme sonucunda elde edilen koordinat çözümleri verilmektedir. Şekillerde gösterilen koordinat bileşenleri ortalama koordinat bileşeni ile ilgili bileşen arasındaki farklardır. Ortalama koordinat değerleri, ikinci oturum ölçülerinin 5° eğim açısı ve Sigma- ϵ ağırlık modeli ile değerlendirilmesi sonucu elde edilen koordinatların ortalamasıdır. Bu değerler bütün modeller için kullanılmıştır. Gösterilen koordinatlar HEI2 istasyonuna aittir ve HEI1-HEI2 bazının çözümü ile elde edilmiştir. Şekillerde Sigma- ϵ ve eş-ağırlıklı modellerle elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Birinci oturum için çizilen yükseklik değerleri, hesaplanan yükseklik değerleri ile önceden bilinen gerçek anten konumu arasındaki farklardır.

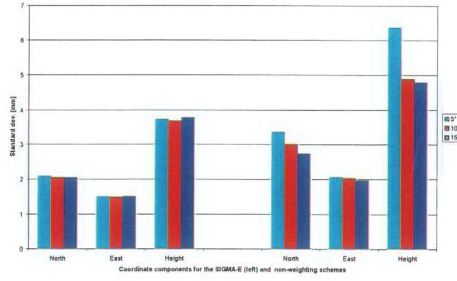
Sigma- ϵ ya da eş-ağırlık algoritmaları ile elde edilen epok-epok sonuçları ikinci oturumda elde edilen tüm koordinat bileşenlerinin değişimlerinin (variation) birinci oturuma göre daha iyi olduklarını göstermektedir. Tablo 6.1'de her iki oturum için

elde edilen koordinat bileşenlerinin standart sapma değerleri verilmektedir. Karesele ortalama hata değerleri şekillerde gösterilen değişimlerden elde edilmiştir. Bu standart sapmalar Şekil 6.18 ve Şekil 6.19'da grafik şeklinde gösterilmektedir.

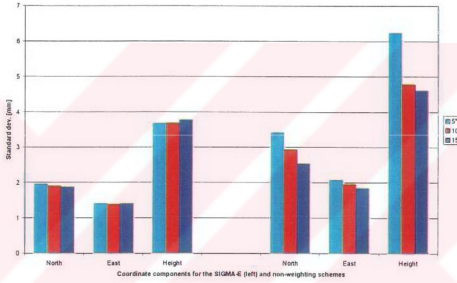
Sigma- ϵ modeli tüm minimum eğim açısı değerleri için hemen hemen aynı sonucu vermektedir. Ancak eş-ağırlık modeli ile düşük eğim açılı değerlendirmelerde daha kötü sonuçlar elde edilmektedir. Bunun nedeniyse, daha önce de vurgulandığı gibi düşük eğim açılı sinyaller üzerindeki troposferik gecikme ve multipath etkisinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Sigma- ϵ modelinde ağırlıklandırma kullanılan ölçüt sinyal kalitesidir, yani ölçüler C/N_0 değerlerine göre ağırlıklandırılır ve böylece düşük eğim açılı ölçülerin düşük ağırlıklarla dengelemeye sokulması mümkün hale gelir. Böylece daha iyi uydü geometrisi ile sağlanır ve çözüm presizyonu artırılmış olur. Bu durum özellikle de yükseklik bileşeni açısından önemlidir. Uydü geometrisi ne kadar iyi olursa yükseklik bileşeninin doğruluğu da o oranda iyileşir. Yükseklik bileşeni çözümü, troposferik gecikme, zayıf uydü geometrisi ve multipath etkilerinden büyük oranda etkilendiği için, elde edilen doğruluk yatay konum bileşenlerinin doğruluğuna göre daha kötüdür. Eş-ağırlık modelinde ise ölçüler birbirlerine göre ağırlıklandırılmaz ve bu da düşük eğim açılı sinyallerin yanlış yorumlanmasına yol açar.

Tablo 6.1: Koordinat bileşenlerinin standart sapmaları (mm) birinci oturum ve ikinci oturum (HEI1-HEI2)

	5°			10°			15°		
<i>Oturum 1</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>
<i>Sigma-ϵ</i>	±2.09	±1.50	±3.72	±2.05	±1.49	±3.67	±2.05	±1.51	±3.77
<i>Eş-ağırlık</i>	±3.36	±2.06	±6.36	±3.00	±2.03	±4.88	±2.74	±1.97	±4.79
<i>Oturum 2</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>
<i>Sigma-ϵ</i>	±1.95	±1.40	±3.67	±1.90	±1.38	±3.68	±1.87	±1.40	±3.77
<i>Eş-ağırlık</i>	±3.41	±2.07	±6.22	±2.93	±1.95	±4.78	±2.53	±1.84	±4.60



Şekil 6.18: Birinci oturumdaki koordinat çözümlerinin standart sapmaları (HE11-HE12)



Şekil 6.19: İkinci oturumdaki koordinat çözümlerinin standart sapmaları (HE11-HE12)

Sigma-ε çözümünde koordinat bileşenlerinin değişimleri her iki oturumda da aynı ize (trace) sahiptir. Ancak ilk değerlendirme aşamasında olduğu gibi sonuçların bazı bölümlerdeki tekrar edilebilirliklerinin çok iyi olmadığı görülmektedir. Yapay olarak uygulanmış düşey hareket nedeniyle ilk oturumdaki izler daha büyük orandan değişim göstermektedir. Bu durumun bir diğer nedeni olarak ilk günkü olumsuz hava şartları gösterilebilir. Eş-ağırlık modeli ile değerlendirme ile elde edilen sonuçlarda da benzer bir durum söz konusudur. Ancak koordinat bileşeni çözümlerinin tekrar edilebilirliği 5° eğim açısı ile yapılan değerlendirmede çok daha kötüdür ve Sigma-ε modeli ile yapılan değerlendirmeye göre daha büyük değişim göstermektedir.

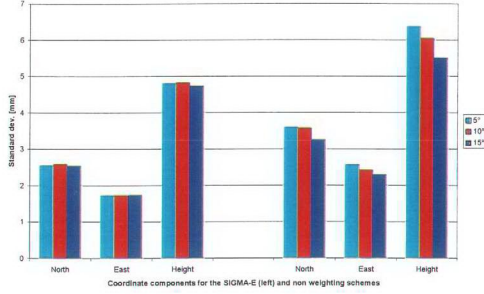
Şekil A.4'te Sigma-ε ve eş ağırlık modelleri ile elde edilen koordinat bileşenlerine ilişkin PSD tahminlerinin yarı logaritmik ölçekli çizimleri gösterilmektedir. Bu grafikler ilk analizle karşılaştırıldığında, periyodik salınımlarının büyüklüklerinin

çok daha az olduğu görülmektedir. Bu salınımlar signifikant olarak sadece yükseklik bileşeninde yaklaşık 0.0028 Hz ($5^{\text{dak}} 57^{\text{sn}}$), 0.0015 Hz ($11^{\text{dak}} 07^{\text{sn}}$) ve 0.001 Hz ($16^{\text{dak}} 40^{\text{sn}}$) frekanslarında gerçekleşmektedir. İkinci oturumdaki sinyal büyüklükleri, ilk oturumdakilerden daha büyüktür.

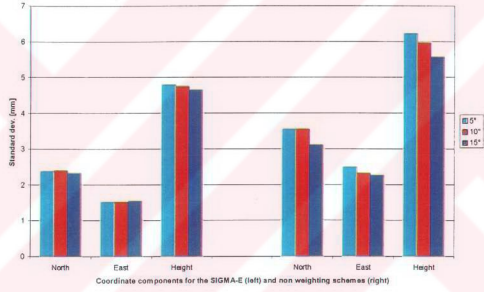
Daha uzun olan HEI3-HEI2 baz kenarının çözümü de aynı şekilde yapılmıştır. Şekil A.5, A.6 ve A.7'de sırasıyla 5° , 10° ve 15° eğim açıları ile yapılan değerlendirme ile elde edilen koordinat çözümleri verilmektedir. Sonuçlar ilk oturumdaki koordinat çözümlerinin ikinci oturumdakilere göre daha büyük değişim gösterdiğini ve tekrar edilebilirliklerinin kısa baz kenarı HEI1-HEI2'ye göre daha kötü olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durumun nedeni HEI3 istasyonundaki görece daha fazla olan sinyal distorsiyonu ve troposferik gecikme etkileri şeklinde açıklanabilir. Tablo 6.2'de her iki oturum için hesaplanan standart sapma değerleri verilmektedir. Bu standart sapma değerleri Şekil 6.20 ve Şekil 6.21'de grafik olarak gösterilmektedir. Bu baz kenarında da Sigma- ϵ çözümü bütün eğim açılarında benzer sonuçları vermekte, eş-ağırlık modeli ile elde edilen çözümler ise azalan eğim açısı ile birlikte kötüleşmektedir.

**Tablo 6.2: Koordinat bileşenlerinin standart sapmaları (mm)
birinci oturum ve ikinci oturum (HEI3-HEI2)**

	5°			10°			15°		
	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>
<i>Oturum 1</i>									
<i>Sigma-ϵ</i>	± 2.55	± 1.73	± 4.81	± 2.58	± 1.73	± 4.82	± 2.54	± 1.74	± 4.74
<i>Eş-ağırlık</i>	± 3.59	± 2.57	± 6.36	± 3.57	± 2.42	± 6.04	± 3.25	± 2.29	± 5.50
<i>Oturum 2</i>									
<i>Sigma-ϵ</i>	± 2.37	± 1.52	± 4.79	± 2.39	± 1.52	± 4.75	± 2.32	± 1.54	± 4.65
<i>Eş-ağırlık</i>	± 3.55	± 2.48	± 6.22	± 3.54	± 2.31	± 5.96	± 3.11	± 2.26	± 5.56



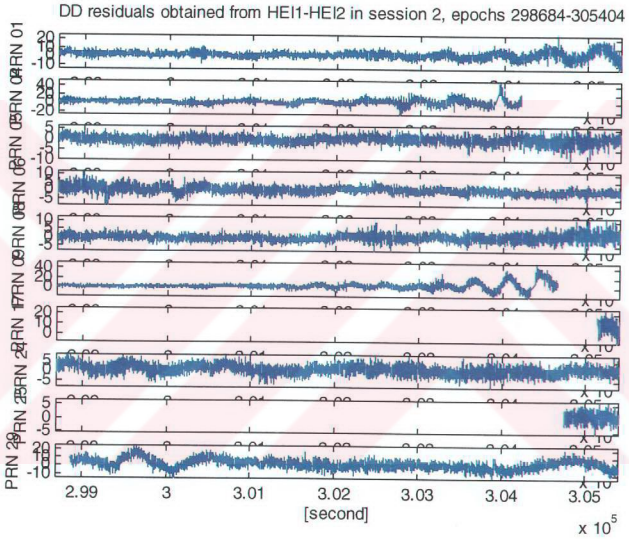
Şekil 6.20: Birinci oturumdaki koordinat çözümlerinin standart sapmaları (HEI3-HEI2)



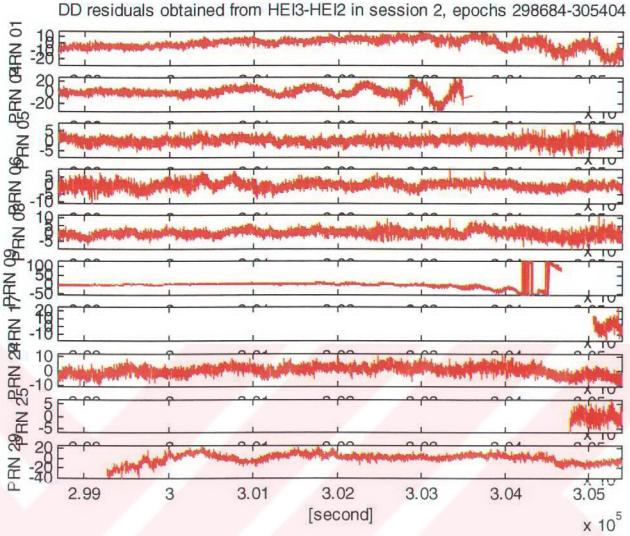
Şekil 6.21: İkinci oturumdaki koordinat çözümlerinin standart sapmaları (HEI3-HEI2)

PSD tahminlerinin yarı logaritmik ölçekli çizimleri Şekil A.8’de verilmektedir. Periyodik salınımlar HEI1-HEI2 baz kenarına göre daha büyüktür. Her iki oturum için elde edilen sonuçlar hemen hemen aynıdır. Her iki oturumda da yükseklik bileşenindeki en büyük salınımlar 0.0028 Hz ($5^{\text{dk}} 57^{\text{sn}}$) frekansında gerçekleşmektedir. Ayrıca ilk oturumda 0.00075 Hz ($22^{\text{dk}} 13^{\text{sn}}$) ve 0.0035 Hz ($4^{\text{dk}} 46^{\text{sn}}$) frekanslarında, ikinci oturumda ise 0.0015 Hz ($11^{\text{dk}} 07^{\text{sn}}$) ve 0.0009 Hz ($18^{\text{dk}} 31^{\text{sn}}$) frekanslarında salınımlar söz konusudur. Yükseklik bileşenindeki bu salınımlara ek olarak kuzey bileşeninde 0.002 Hz ($8^{\text{dk}} 20^{\text{sn}}$) frekansında bir salınım söz konusudur. Kuzey bileşeni dışında, ikinci oturumdaki sinyal büyüklükleri ilk oturuma göre daha düşüktür.

Bu ölçü grubu için DD düzeltmeleri, ölçme süresince eğim açısı minimum 52° olan PRN30 uydusu referans alınarak hesaplanmıştır. İlk oturumdaki DD düzeltmeleri uygulanan düşey hareketten etkilendikleri için yalnızca ikinci oturumdaki düzeltmeler değerlendirilmiştir. Şekil 6.22 ve Şekil 6.23'te gözlem yapılan her uydudaki DD düzeltmeleri verilmiştir. Yüksek eğim açılı uydular için düzeltme değerleri sıfır dolayında küçük değişimler göstermektedir. PRN04, PRN09 ve PRN29 uyduları için hesaplanan DD düzeltmelerinde bazı sinüzoidal salınımlar söz konusudur.

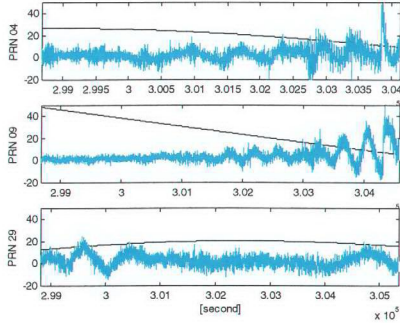


Şekil 6.22: İkinci oturumda HEI1-HEI2 için DD değerleri



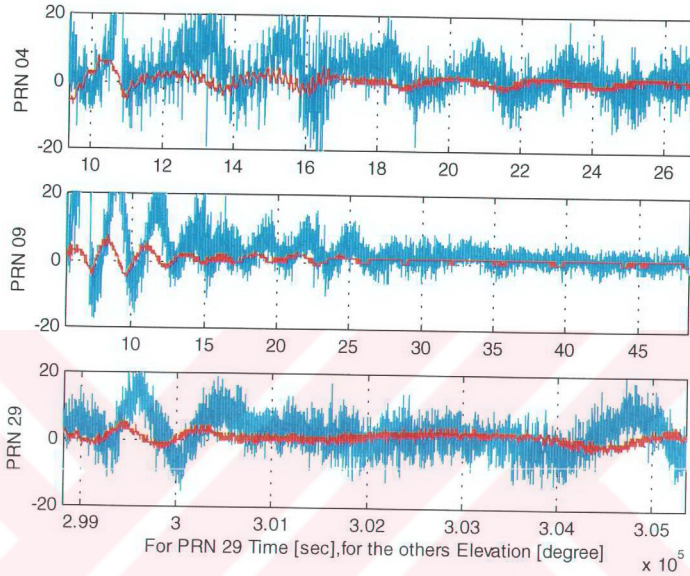
Şekil 6.23: İkinci oturumda HEI3-HEI2 için DD değerleri

Şekil 6.24'te PRN04, PRN09 ve PRN 29 uydularına ilişkin DD düzeltmeleri ve eğim açıları verilmektedir. Bu şekillerde de salınım büyüklüklerinin azalan eğim açısıyla birlikte arttığı görülmektedir.



Şekil 6.24: PRN04, PRN09 ve PRN29 için ikinci oturumdaki DD düzeltmeleri (mm, cyan) ve eğim açıları (derece, siyah)

Hesaplanan C/N_0 farkları ve DD düzeltmeleri Şekil 6.25'te gösterilmektedir. PRN29 dışındaki uydulara ilişkin DD düzeltmeleri eğim açılarına göre gösterilmiştir.



Şekil 6.25: DD düzeltmeleri (mm, cyan) ve C/N_0 farkları (dB-Hz, kırmızı) eğim açısına (derece) karşı

Anten konumu sabit durumdayken yapılan ölçülerin analizinde de vurguladığı gibi, burada da C/N_0 izi DD düzeltmeleri ile aynı şekil yapısına sahiptir. Ancak iki iz arasında bir kayma söz konusudur. Uydu yükseldikçe C/N_0 salınımları DD düzeltmelerine göre daha erken, alçaldıkça ise daha geç gerçekleşmektedir. Arada belirli bir zaman farkı yoktur. C/N_0 değerleri ve DD düzeltmeleri arasında PRN04, PRN09 ve PRN29 uyduları için sırasıyla yaklaşık 150, 110 ve 160 saniye fark vardır. Şekil 6.24'te gösterildiği gibi PRN29 uydusu oturumun ilk yarısında yükselmekte, ikinci yarısında ise alçalmaktadır. Bunun sonucunda, zaman farkının işareti ikinci yarıda değişmektedir. C/N_0 değerleri ve DD düzeltmeleri arasındaki bu zaman farkı aralarındaki çapraz korelasyonların daha kötü olmasına yol açmaktadır.

6.2 Uzun Baz Kenarlarında Uygulama

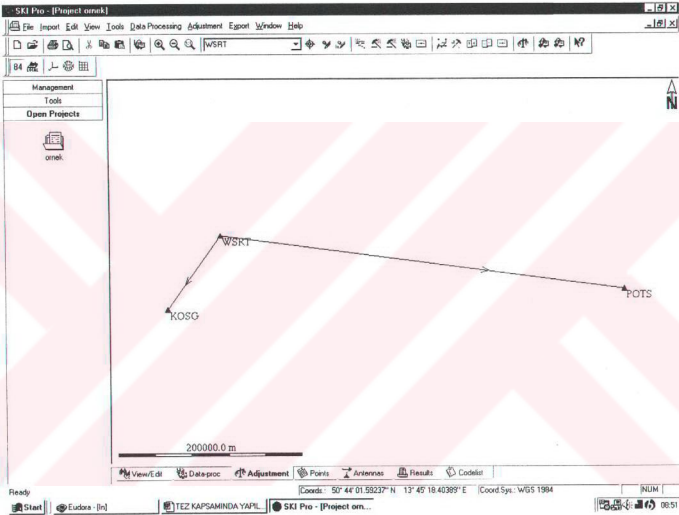
Bu çalışmanın ilk uygulama bölümünde sinyal kalitesine dayalı ağırlıklandırma modelleri, uzunlukları 119.81 m. ve 514.19 m. olan iki baz çözümü üzerinde uygulanmıştır. Bu kısa baz çözümlerinde kullanılan ölçü grubu, bir saniye aralıkla toplanmış ölçülerden oluşmaktadır ve elde edilen sonuçlar, kısa bazlarda bu ağırlık algoritmalarının uygulanabilir olduğunu ortaya koymuştur. Sinyal kalitesine dayalı modelde olduğu gibi, düşük eğim açılı ölçülerin değerlendirme kapsamına alınabilmesini olanaklı kılan bir diğer model ise (5.5) eşitliği ile verilen eğim açısına dayalı ağırlıklandırma modelidir. Bu model de, azalan eğim açısı ile birlikte artan noise oranı göz önünde bulundurulduğunda alternatif bir ağırlıklandırma algoritmasıdır. Uzun bazlarda ağırlık algoritmasının sonuçlar üzerindeki etkisinin irdelenmesinde bu algoritma kullanılmıştır. Bunun nedeni, Bernese 4.2 yazılımının bu ölçüleri içermeyen RINEX 2.0 formatı ile çalışması ve karmaşık program yapısı nedeniyle sinyal kalitesine dayalı ağırlık algoritmalarının programa uyarlanmasının güçlüğüdür. Eğim açısına bağlı ağırlık algoritmasının, sinyal kalitesine bağlı ağırlık algoritmalarına yakın sonuçlar vereceği varsayımıyla bu değerlendirmeler yapılmıştır.

Bu bölümde, ağırlık modellerinin uzun baz kenarlarında denemesi amacıyla Uluslararası GPS Servisi (IGS) noktalarından üç nokta seçilmiş, bu noktalarda toplanan sekiz günlük, otuz saniye ölçme aralıklı ölçü verisi hem eş ağırlıklı olarak, hem de eğim açısına bağımlı ağırlık modeli ile değerlendirilmiş ve çözümler üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

Seçilen IGS noktaları, KOSG (Kootwijk Observatory for Satellite Geodesy - Kootwijk Uydu Jeodezisi Gözlemevi, Hollanda), POTS (Potsdam GeoForschungsZentrum – Potsdam Yeryüzü Araştırma Merkezi, Almanya) ve WSRT (Westerbork Synthesis Radio Telescope - Westerbork Bağlantısı Radyo Teleskopu, Hollanda) noktalarıdır. Bu noktaların seçilmesinin nedeni, toplanan ölçülerin, aynı zamanda sinyal-noise oranı bilgilerini de içeren RINEX 2.1 formatında olmasıdır ve bu çalışmanın devamı

niteliindeki çalışmalarda sinyal kalitesine bağlı ağırlık algoritmalarının uygulanabilmesine olanak sağlayabilecek olmasıdır.

Söz konusu noktalardan WSRT noktası sabit alınarak, seçilen IGS noktalarının oluşturduğu WSRT-KOSG =98073.3 m. ve WSRT-POTS=441226.7 m. uzunluğundaki baz kenarları değerlendirilmiştir. Nokta konumları ve değerlendirilen baz vektörleri Şekil 6.26'da gösterilmektedir.



Şekil 6.26: Değerlendirmeye konu olan IGS noktaları

Noktaların ITRF97 kartezyen koordinatları ve WGS84 coğrafi koordinatları Tablo 1'de verilmektedir (SOPAC, 2001). Değerlendirmelerde, uzun kenarlı bazlarda kullanıldığında daha iyi sonuç verdiği ortaya konan Niell mapping fonksiyonu kullanılmaktadır. İlk uygulama örneğinde olduğu gibi 5°, 10° ve 15° minimum eğim açısı kullanılarak, eş ağırlıklı ve Cos^2z stokastik modeli ile elde edilen değerlendirme sonuçları analiz edilmiştir. Değerlendirmelerde kullanılan ölçüler, söz konusu IGS noktalarında 27 Ekim 2001-3 Kasım 2001 (1137. GPS haftası, 2001 yılının 300. ve 307. günleri arası) tarihleri arasında toplanmış ölçülerdir.

Tablo 6.3: Nokta koordinatları

Nokta	X _{ITRF97} (m)	Y _{ITRF97} (m)	Z _{ITRF97} (m)	Φ_{WGS84} (der.)	λ_{WGS84} (der.)	h _{WGS84} (m)
KOSG	3899225.190	396731.899	5015078.384	52.17842611	5.80964326	96.850
POTS	3800689.687	882077.340	5028791.287	52.37929692	13.06609049	144.418
WSRT	3828735.916	443304.911	5064884.682	52.91461055	6.60450464	82.285

Görece daha uzun bir zaman diliminde toplanmış ölçülerin değerlendirilmesi ile daha gerçekçi sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir. Ölçülerin değerlendirilmesinde, Bernese yazılımının uzun baz kenarlarının değerlendirmesinde kullanılan standart değerlendirme adımları uygulanmıştır. Uygulanan bu değerlendirme stratejisi aşağıda Tablo 6.4'de verilmektedir.

WSRT-KOSG ve WSRT-POTS baz kenarları yukarıda ayrıntılanan strateji ile değerlendirilmiş ve her epok için koordinat bileşenleri hesaplanmıştır. Değerlendirmede kullanılan ölçüler 30 saniye aralıklı olduğu için, ilk uygulamada olduğu gibi kapsamlı bir analiz yapılmamış, ağırlıklandırmanın sonuçlar üzerindeki etkisi, sonuçların tekrar edilebilirlikleri bağlamında ele alınmıştır.

Daha önce de vurgulandığı gibi her iki baz çözümü de minimum eğim açısı 5°, 10° ve 15° olacak şekilde üç ayrı değerlendirmeye tabi tutulmuş, bu değerlendirmelerde eş ağırlıklı ve eğim açısına dayalı ağırlık algoritmasına bağlı olarak sonuçlar elde edilmiştir. Her bir koordinat bileşenine ilişkin sonuçları içeren grafikler Ek B'de verilmektedir. Elde edilen koordinat bileşeni çözümlerinin karesel ortalama hata değerleri Tablo 6.5'de gösterilmektedir.

Şekil 6.27 ve Şekil 6.28'de ise, sırasıyla WSRT-KOSG ve WSRT-POTS baz çözümleri için elde edilen bu karesel ortalama hata değerlerinin grafik gösterimi sunulmaktadır.

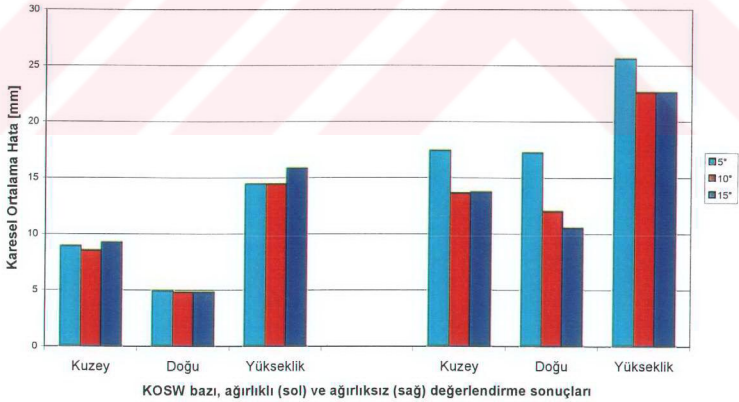
Tablo 6.4: Bernese yazılımı ile değerlendirme stratejisi

Ölçme aralığı	30 saniye
Yörünge bilgileri	IGS presizyonlu efemeris ve yer dönme parametreleri
Eğim açısı	5°, 10°, 15°
Anten Faz Merkezi	PHAS-IGS.01 dosyası
Troposferik model	Ön değerlendirmede Saastamoinen modeli Troposferik gecikme tahmininde Niell mapping fonksiyonu Her saat için bir troposferik gecikme tahmini Öncül k.o.h.: ±5 m
Alıcı saat senkronizasyonu	L ₃ kod verisi kullanılarak tek nokta konum belirleme
Faz kayması sabitleme Veri kalitesinin kontrolü	L ₁ ve L ₂ faz ölçülerinin lineer kombinasyonu ile Belirsizlikten bağımsız L ₃ kod verisi ile
Belirsizlik çözümü	QIF stratejisi, L ₁ +L ₂
Korelasyonlar	“Correct” korelasyonları
Ağırlıklandırma algoritması	Eş ağırlıklı, Cos ² z modeli
Tek gün çözümleri	a) 10 m. öncül k.o.h., nokta konumları sabit değil, QIF stratejisi ile L ₁ +L ₂ kullanılarak çözülmüş belirsizlikler kullanılarak çözüm. Normal denklemlerin kaydedilmesi. (ters almadan önce normal denklemlerde belirsizlikler elimine edilmekte, troposferik parametreler ise ters alma işlemi sonrasında elimine edilmektedir) b) WSRT istasyonuna bağlı olarak konumların belirlenmesi

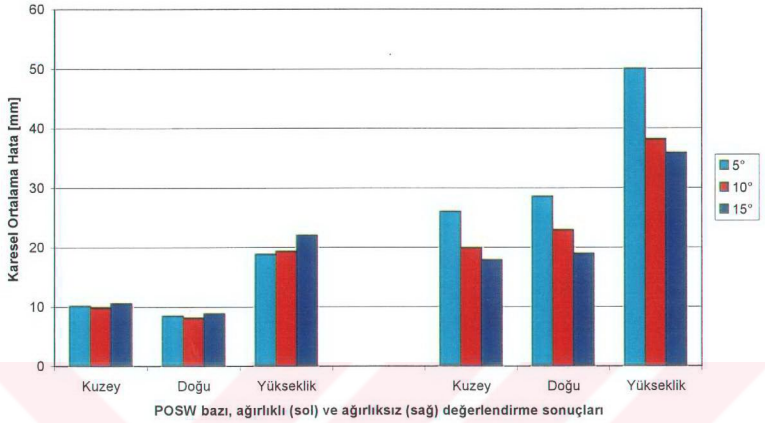
Tablo 6.5: Koordinat bileşenlerinin standart sapmaları (mm)

KOSG ve POTS istasyonları

	5°			10°			15°		
<i>WSRT-KOSG</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>
Cos^2z	±8.86	±4.90	±14.40	±8.49	±4.8	±14.40	±9.18	±4.75	±15.78
<i>Eş-ağırlık</i>	±17.41	±17.26	±25.63	±13.60	±11.96	±22.60	±13.74	±10.54	±22.57
<i>WSRT-POTS</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>	<i>Kuzey</i>	<i>Doğu</i>	<i>Yüks.</i>
Cos^2z	±10.10	±8.41	±18.81	±9.79	±8.18	±19.31	±10.55	±8.83	±22.00
<i>Eş-ağırlık</i>	±25.97	±28.47	±49.97	±19.84	±22.84	±38.06	±17.77	±18.86	±35.77



Şekil 6.27: KOSG istasyonu için koordinat çözümlerinin standart sapmaları



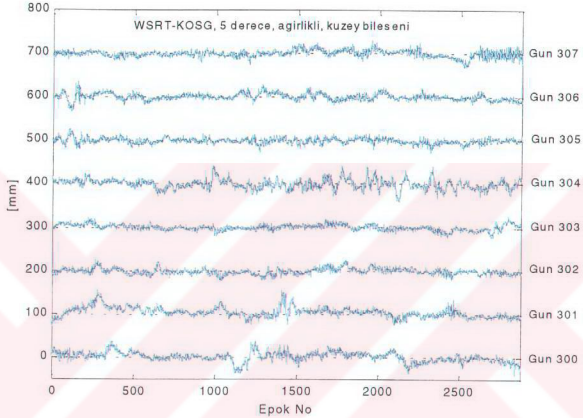
Şekil 6.28: POTS istasyonu için koordinat çözümlerinin standart sapmaları

6.2.1 Sonuçların değerlendirilmesi

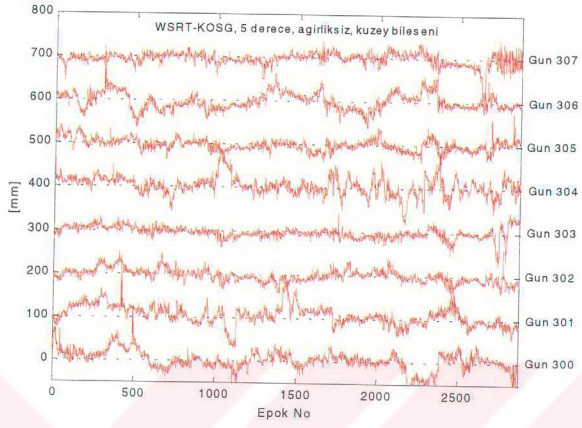
Eğim açısına bağlı olarak ağırlıklandırma ile elde edilen sonuçlar, önceki alt bölümde ele alınan kısa baz kenarı değerlendirmelerine benzer bir tablo ortaya koymaktadır. Ağırlıklandırma ile elde edilen koordinat bileşeni çözümlerinin tekrar edilebilirlikleri daha iyidir. Ölçülerin eş ağırlıklı olarak değerlendirilmeleri ile elde edilen çözümler, eğim açısı azaldıkça kötüleşmektedir, tekrar edilebilirlikleri eğim açısı arttıkça iyileşmektedir. Ağırlıklandırma ile yapılan değerlendirme ise her üç eğim açısı ile yapılan değerlendirmede özdeş sonuçlar elde edilmiştir.

İrdeleme kapsamında yapılabilecek bir başka karşılaştırma ise, ardışık günlerde elde edilen çözümlerin karşılaştırılmalarıdır. Örnek olarak WSRT-KOSG baz kenarının 2001 yılı 300 ve 307. günleri arasındaki kuzey bileşenine ilişkin değerlendirme sonuçları, ağırlıklı ve ağırlıksız olmak üzere sırasıyla Şekil 6.29 ve Şekil 6.30'da gösterilmektedir. Örnek olarak alınan bu çözüm dışındaki çözümlerde de benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Şekillerden de görüleceği gibi, ardışık günlere ait çözümlerin izleri arasında, kısa baz çözümlerinde olduğu gibi bir benzerlik yoktur. Bunun nedeniyse, baz kenarının çözümünde troposferik gecikme, iyonosferik gecikme vb. hataların görece daha yüksek oluşu ve kısa baz kenarlarına göre değişken karakterli olmalarıdır.



Şekil 6.29: 2001 yılı 300-307. günleri arasında kuzey bileşeni çözümü Cos^2z modeli ile ağırlıklandırılmış, minimum eğim açısı 5°



**Şekil 6.30: 2001 yılı 300-307. günleri arasında kuzey bileşeni çözümü
Eş ağırlıklı, minimum eğim açısı 5°**

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Önceki bölümlerde de vurgulandığı gibi, GPS ölçmeleri ile elde edilen doğruluğu sınırlayan temel faktörler multipath ve troposferik gecikme etkileridir. Uygulamada bu etkilerin etkilerini en aza indirmek için izlenen başlıca yöntem, değerlendirmede minimum eğim açısının 15° ya da 20° alınmasıdır. Bu yaklaşımın dezavantajı ise uydu geometrisinin göreceli olarak zayıflaması ve bunun sonucunda, elde edilen doğruluğun azalmasıdır. Görüş çizgisi ufka yaklaştıkça, multipath ile troposferik gecikme etkileri ve buna koşut olarak da taşıyıcı faz noise değeri artmaktadır Böylece ölçülerin noise değerleri ile diğer tüm etkiler arasında bir ilişki kurulabilir. Bu konudaki bir başka yaklaşım ise, bu ilişkinin ölçülerin eğim açısı değerlerine bağlı olarak kurulmasıdır.

Bu çalışmada ilk olarak bu ilişki, sinyal kalite ölçütleri ile stokastik model oluşturma yoluyla kurulmuş ve kısa baz kenarı çözümlerinde uygulanmıştır. Ayrıca uzun bazlarda sinyal kalitesinin eğim açısının düşmesiyle birlikte azaldığı, dolayısıyla eğim açısına bağımlı stokastik modellerin sinyal kalitesi ölçütlerine dayalı stokastik modellere yakın sonuçlar vereceği düşünülerek, eğim açısına bağımlı bir ağırlık modeli uzun baz kenarı çözümlerinde uygulanmıştır.

GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde genel uygulama, tüm ham ölçüler için aynı varyans değerinin kullanılması ya da bir başka ifadeyle bu ölçülerin istatistiksel olarak bağımsız kabul edilmeleridir. Ancak bu yaklaşım gerçekçi bir yaklaşım değildir. GPS ölçülerinin stokastik özellikleri değerlendirme sürecinde hesaba katılmalıdır. Bu süreçte, herhangi bir ölçme kümesine ait varyans değerleri, değerlendirilen verilerin noise karakteristiklerini yeteri kadar yansıtabilmelidir. Bu da dikkatlice seçilmiş stokastik modellerin GPS değerlendirmelerindeki rolünü ortaya koymaktadır.

Bu çalışmada ele alınan ve kısa baz kenarı çözümlerinde kullanılan stokastik modeller, doğrudan GPS taşıyıcı faz ölçülerinin kalitesini yansıtan SNR değerlerine dayalıdır. GPS

sinyalinin taşıyıcı faz varyansının modellenmesi için SNR bilgileri kullanılmış ve böylece aynı ölçme sürecinde ve GPS ölçülerinin yapıldığı aynı zaman diliminde hazır olarak elde edilebilen bu bilgilerin kullanımının sağladığı avantajlar ortaya konmuştur. Bu anlamda, sinyal kalitesine dayalı iki ağırlık modeli GPS değerlendirme algoritmalarına uyarlanmış ve bu stokastik modellerin GPS çözümleri üzerindeki etkileri bu araştırma çalışması için özel olarak toplanmış bir veri kümesi üzerinde değerlendirilmiştir. Ayrıca geleneksel olarak uygulanan, tüm ölçülerin eş ağırlıklı olarak dengelemeye sokulduğu yaklaşım da değerlendirme kapsamına alınmıştır. Sinyal kalitesine dayalı iki model, DD taşıyıcı faz ölçülerinin ağırlıklandırılması için SNR verilerinden türetilmiş C/N_0 değerlerinin kullanıldığı Sigma- ϵ ve Sigma- Δ modelleridir. Elde edilen sonuçlar, ölçmelerin yapıldığı alan sinyal difraksiyonu etkisine maruz kalmayan bir alan olduğu için her iki modelin kullanımıyla özdeş sonuçlar elde edilmiştir. Bu nedenle sayısal uygulama bölümünde Sigma- ϵ modeli ile yapılan değerlendirme sonuçları eş-ağırlık modeli ile karşılaştırılarak analiz edilmiştir.

Kısa baz kenarı çözümlerinde elde edilen sonuçlar, sinyal kalitesine dayalı stokastik modellerin kullanımının daha önce vurgulanan multipath ve troposferik gecikme etkilerine olan duyarlılıkları nedeniyle daha avantajlı oldukları savını doğrulamaktadır.

Uygulanan Sigma- ϵ ve Sigma- Δ modellerinde, taşıyıcı faz ölçülerinin varyans değerleri, orijinal veri dosyalarında kaydedilen C/N_0 ölçüsü değerleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Her alıcının kendine özgü sinyal kalite ölçütü vardır. Ancak, genel olarak alıcıların ölçtüğü sinyal kalite ölçütü olan SNR bilgilerinin nasıl elde edildiği tam olarak bilinmemektedir. Halihazırda alıcı üreten firmaların SNR (ya da C/N_0) bilgisi sağlama zorunlulukları yoktur ve bu bilgileri sağlayanlar bu değerleri çoğunlukla indirgenmiş bir formatta rapor etmektedirler. Bu duruma yol açan etmenlerden biri, günümüzde yaygın olarak kullanılan RINEX 2.0 (Receiver Independent Exchange Format – Alıcılardan Bağımsız Dönüşüm Formatı) format yapısının C/N_0 değerleri için gerekli tanımlamaları içermemesidir. SNR değerlerinin, GPS ölçülerini içeren RINEX format yapısındaki dosyalarda ne şekilde yer alacağı, bu konuda nasıl bir standardizasyona gidileceği konusundaki tartışmalar sonucunda, RINEX formatının 2.1 versiyonunda SNR değerleri, gerekli dönüşüm algoritmalarının varlığına bağlı olarak yer almıştır. Bir taraftan,

RINEX 2.1 formatının kullanımının benimsenmesi SNR bilgilerinin daha rahat kullanımını sağlayacaktır. Diğer taraftan, alıcı üreticisi firmaların ölçü dosyasında yer alan SNR değerlerinin nasıl elde edildiği konusunda yeterli bilgi vermemeleri sorununun aşılmasıyla, GPS kullanıcıları ham veri akışı içerisinde alıcı tarafından üretilmiş değerleri, üzerinde uzlaşılan SNR ya da C/N_0 değerlerine kolaylıkla dönüştürme olanağına sahip olacaklardır.

Sinyal kalitesine bağlı stokastik modellerle yapılan kısa baz kenarı çözümlerinde Sigma- ϵ ve Sigma- Δ modelleri özdeş sonuçlar vermelerine karşın, özellikle de sinyal difraksiyonunun söz konusu olduğu durumlarda Sigma- Δ modeli uygun olarak kullanılabilir. Her iki modelin de uygulanmasıyla düşük eğim açılı ölçüler kullanılmakta, böylece uydu geometrisi ve yükseklik bileşeninin çözümü iyileşmektedir. Uygulamada, her iki modelin de uygun bir şekilde GPS taşıyıcı faz ölçülerinin değerlendirilmesinde kullanılabilceği ortaya konmuştur. Bu yolla ölçüler, doğrudan yan ürünleri olan bir kalite ölçütü ile ağırlıklandırılmaktadır. Böylece Sigma- ϵ modeli ile elde edilen varyans değerleri, varolan sinyal kalitesini çok daha gerçekçi bir şekilde yansıtmakta, ölçüler arasında stokastik ilişkinin kurulmasında kullanılabilir. C/N_0 varyansları sıfır fark (zero difference) düzeyinde tahmin edildikleri için Sigma- ϵ modeli farklı anten karakteristiklerine ve ölçme yapılan istasyondaki farklı çevresel koşullara duyarlıdır. Elde edilen sonuçlar C/N_0 değerlerinin istasyonların konumuna bağlı olarak farklılaştığını ortaya koymaktadır. Bu durumsa multipath, ve troposferik gecikme etkilerinin karmaşık yapısından kaynaklanmaktadır. Sigma- ϵ ve Sigma- Δ modelleri ile elde edilen sonuçlar eş-ağırlıklı modele göre daha iyidir, özellikle de 5° ya da 10° minimum eğim açısı ile yapılan değerlendirmelerde, çok daha iyi sonuçlar elde edilmektedir.

Uygulama bölümünün ikinci aşamasında, yaklaşık 98 km ve 441 km uzunluklarındaki iki uzun baz kenarına ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmede, bu kez, ölçülerin eğim açısına bağımlı olarak ağırlıklandırıldıkları $\text{Cos}^2(z)$ algoritması kullanılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda da, ölçülerin ağırlıklandırılmalarıyla, düşük eğim açılı ölçülerin değerlendirilmesinde daha iyi sonuçların elde edildiği ortaya konmuştur. Sonuçlar, multipath ve troposferik etkilerin birbirinden uzak noktalarda

değişkenlik sergilemesi nedeniyle, multipath etkisini doğrudan ortaya koymamaktadır. Ancak, elde edilen koordinat çözümlerinin tekrar edilebilirliği eş ağırlıklı değerlendirmeye göre oldukça iyidir.

GPS ölçülerinin değerlendirilmesiyle elde edilen çözümün doğruluğunu etkileyen bir başka etmen kullanılan troposferik gecikme modelleri ya da atmosferik mapping fonksiyonlarıdır. Troposferik gecikme etkisi, bu çalışmanın ilk uygulama örneğinde olduğu gibi atmosferik koşulların gözlem yapılan noktalarda büyük oranda aynı olduğu kısa baz kenarlarının çözümünde sonuçlar üzerinde etkili olmayabilir. Ancak ölçme noktalarında atmosferik koşulların, dolayısıyla gecikme etkisinin farklılaştığı orta ya da uzun kenarlı bazların değerlendirilmesinde kullanılan troposferik gecikme modelleri önemli bir rol oynar. Bu konuda yapılan çalışmalara altlık oluşturacağı düşüncesiyle, Bölüm 4'te geleneksel ve yakın geçmişte üretilmiş troposferik gecikme modelleri ve mapping fonksiyonları ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Bu modellerin yüksek presizyonlu GPS uygulamalarında kullanımı, konum belirleme doğruluğunun geliştirilmesine değerli katkılar sağlamıştır. Bu modeller de, sinyal kalitesi ölçütleri gibi, GPS ölçmeleri için stokastik model geliştirilmesinde potansiyel araçlar olarak düşünülebilir. Uygun stokastik modeller ve troposferik modeller ile kurulacak kombinasyonların daha iyi doğruluk sağlayacağı ise açıktır. Çalışmanın ikinci uygulama bölümünde, Bölüm 4'te açıklanan modellerden Niell mapping fonksiyonu kullanılmıştır.

Sonuçlardan da görüldüğü gibi, kullanılan stokastik modeller, koordinat çözümlerinin tekrar edilebilirliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca sonuçlar, kısa baz kenarı çözümlerinde birbirini takip eden günlerde benzer multipath etkisini yansıtmaktadır. Bu nedenle bu modellerin multipath iyileştirme algoritmalarının geliştirilmesinde de kullanılabilmesi olasıdır. Sinyal kalitesine dayalı ağırlık modelleri ile yapılan uygulamada bu konuda karşımıza çıkan dezavantaj ise DD düzeltmeleri ve C/N_0 farkları arasındaki değişken karakterdeki zaman farkıdır. Bu değerlere ilişkin grafiklerde bu fark gözlemlenmekte, ancak sabit olmayan bu değerlerin yorumlanması güçleşmektedir. Bu nedenle, bu olgu da göz önünde bulundurularak, sinyal kalitesi ölçütlerine dayalı stokastik modeller ile multipath iyileştirme algoritmalarının geliştirilmesi konusu ayrı bir çalışma başlığı olarak değerlendirilebilir.

Bu çalışmada uygulanan stokastik modellerin GPS lulerinin lme sonrası değerlendirme aşamasında kullanıldıklarını vurgulamalıyız. Bu modeller, özellikle de sabit izleme istasyonlarında yapılan gerçek zamanlı (real-time) lmelerde uygun olarak kullanılabilirler. Multipath iyileştirme algoritmaları ile bütünleşik olarak kullanılmaları durumunda bu alanda önemli bir ilerleme sağlayacakları açıktır.

KAYNAKLAR

- Aparicio, M., Brodie, P., Doyle, L., Rajan, J. and Torrione, P., 1996. GPS satellite and payload, in *Global Positioning System: Theory and Applications*, 1, pp. 209-244, Eds. Parkinson, B.W. and Spilker Jr., J.J., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC.
- Axelrad, P., Comp, C.J. and MacDoran, P.F., 1996. SNR based multipath error correction for GPS differential phase, *IEEE Transactions on Aerospace&Electronic Systems*, 32, 650-660.
- Axelrad, P. and Behre, C.P., 1999. Satellite attitude determination based on GPS signal-to-noise ratio, *Proceedings of the IEEE*, 87, 133-144.
- Barnes, J.B. and Cross, P.A., 1998. Processing models for very high accuracy GPS positioning, *The Journal of Navigation*, 51, 180-193.
- Bisnath, S.B., Mendes, V.B. and Langley, R.B., 1997. Effects of tropospheric mapping functions on space geodetic data, *IGS Analysis Center Workshop*, Pasadena, California, USA, March 12-14.
- Braasch, M.S. and Van Dierendonck, A.J., 1999. GPS receiver architectures and measurements, *Proceedings of the IEEE*, 87, 48-64.
- Braasch, M.S., 1996. Multipath effects, in *Global Positioning System: Theory and Applications*, 1, pp. 547-568, Eds. Parkinson, B.W. and Spilker Jr., J.J., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC.
- Brunner, F.K., Hartinger, H. and Troyer, L., 1999. GPS signal diffraction modelling: the stochastic SIGMA- Δ model, *Journal of Geodesy*, 73, 259-267.
- Brunner, F.K. and Welsch, W.M., 1993. Effect of the troposphere on GPS measurements, *GPS World*, 4, No. 1, 42-51.
- Cohen, C.E., 1996. Attitude determination, in *Global Positioning System: Theory and Applications*, 2, pp. 519-538, Eds. Parkinson, B.W. and Spilker Jr., J.J., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC.

- Collins, J.P. and Langley, R.B.**, 1998. The residual tropospheric propagation delay: How bad can it get?, *Proceedings of ION GPS-98*, Nashville, Tennessee, USA, September 15-18, 729-738.
- Collins, J.P. and Langley, R.B.**, 1999. Possible weighting schemes for GPS carrier phase observations in the presence of multipath, *Contract report for the United States Army Corps of Engineers Center, No DAAH04-96-C-0086 / TCN 98151*, March.
<<http://www.unb.ca/GGE/Personnel/Langley.html>>, 19 March 2001.
- Coster, A.J., Niell, A.E., Solheim, F.S., Mendes, V.B., Toor, P.C., Langley, R.B. and Ruggles, C.A.**, 1996. The Westford water vapor experiment: Use of GPS to determine total precipitable water vapor, *Proceedings of the Institute of Navigation 52nd Annual Meeting*, Cambridge, Massachusetts, USA, June 19-21, 625-634.
<<http://www.unb.ca/GGE/Personnel/Langley.html>>, 19 March 2001.
- Davis, J.L., Herring, T.A., Shapiro, I.I., Rogers, A.E.E. and Elgered, G.**, 1985. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modelling errors on estimates of baseline length, *Radio Science*, **20**, 1593-1607.
- Elosegui, P., Davis, J.L., Jadehag, R.T.K., Johannson, J.M., Niell, A.E. and Shapiro, I.I.**, 1995. Geodesy using Global Positioning Systems: The effects of signal scattering on the estimates of site position, *Journal of Geophysical Research*, **100**, 9921-9934.
- Enge, P. and Misra, P.**, 1999. Scanning the special issue/Technology on Global Positioning System, *Proceedings of the IEEE*, **87**, 3-15.
- Ge, L., Han, S., and Rizos, C.**, 2000. Multipath mitigation of continuous GPS measurements using an adaptive filter, *GPS Solutions*, **4**, 19-30.
<http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/work/base_stations.htm>, 19 March 2001.
- Ge, L., Han, S., Rizos, C. and Hatanaka, Y.**, 2002. GPS multipath change detection in permanent GPS stations, *Survey Review*, **36**, 306-322.
<http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/work/base_stations.htm>, 19 March 2001.
- Han, S. and Rizos, C.**, 2000. GPS multipath mitigation using FIR filters, *Survey Review*, **35**, 487-498.
<http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/work/base_stations.htm>, 19 March 2001.
- Hay, C. and Wong, J.**, 2000. Enhancing GPS: tropospheric delay prediction at the master control station, *GPS World*, **11**, No. 2, 56-62.
- Hartinger, H. and Brunner, F.K.**, 1998a. Experimental detection of deformations using GPS, *Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, Eisenstadt, Austria, April 20-22, 145-152.

- Hartinger, H. and Brunner, F.K.**, 1998b. Attainable accuracy of GPS measurements in engineering surveying, *FIG Congress XXI*, Commission 6, Brighton UK, July 19-25, 18-31.
- Herring, T.A.**, 1992. Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data, in *Proceedings of Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*, pp. 157-164, Eds. de Munck, J.C. and Spoelstra, T.A., The Hague, The Netherlands, May 19-22, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, Delft, New Series No. 36.
- Herring, T.H.**, 1998. *GPS noise analysis using signal-to-noise ratio (SNR) analysis: Software and example*.
<<http://bowie.mit.edu/~tah/snrprog/>>, 19 March 2001.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. and Collins, J.**, 1997. *GPS Theory and Practice*, 4th Edition, Springer-Verlag, Wien, Austria.
- Hopfield, H.S.**, 1969. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data, *Journal of Geophysical Research*, **74**, 4487-4499.
- Hugentobler, U., Schaer, S. and Fridez P. (Ed.)**, 2001. *Bernese GPS Software Version 4.2 Documentation*, Astronomical Institute of the University of Berne.
- Ifadis, I.O.**, 2000. A new approach to mapping the atmospheric effect for GPS observations, *Earth Planets Space*, **52**, 703-708.
- Janes, H.W., Langley, R.B. and Newby, S.P.**, 1991. Analysis of tropospheric delay prediction models: Comparisons with ray tracing and implications for GPS relative positioning, *Bulletin G od esique*, **65**, 151-161.
- Jin, X.X. and de Jong, C.D.**, 1996. Relationship between satellite elevation and precision of GPS code observations, *The Journal of Navigation*, **49**, 253-265.
- Klobuchar, J.A.**, 1996. Ionospheric effects on GPS, in *Global Positioning System: Theory and Applications*, **1**, pp. 485-515, Eds. Parkinson, B.W. and Spilker Jr., J.J., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC.
- Langley, R.B.**, 1990. Why is the GPS signal so complex?, *GPS World*, **1**, No. 3, 56-59.
- Langley, R.B.**, 1992. The effect on the ionosphere and troposphere on satellite positioning systems, in *Proceedings of the Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy*, pp. 97, Eds. de Munck, J.C. and Spoelstra, T.A., The Hague, Netherlands, May 19-22, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, New Series No. 36.
- Langley, R.B.**, 1993. The GPS observables, *GPS World*, **4**, No. 4, 52-59.

- Langley, R.B.**, 1997a. GPS receiver system noise, *GPS World*, **8**, No. 6, 40-45.
- Langley, R.B.**, 1997b. The GPS error budget, *GPS World*, **8**, No. 3, 51-56.
- Langley, R.B.**, 1998. Propagation of the GPS signals, in *GPS for Geodesy*, Second Edition, pp. 111-149, Eds. Teunissen, P.J.G. and Kleusberg, A., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Lau, L. and Mok, E.**, 1999. Improvement of GPS relative positioning accuracy by using SNR, *Journal of Surveying Engineering*, **125**, 185-202.
- Leick, A.**, 1995. GPS satellite surveying, Second Edition, John Wiley&Sons, New York.
- Leva, J.L., de Haag, M.U. and Dyke, K.V.**, 1996. Performance of standalone GPS, in *Understanding GPS Principles and Applications*, pp. 237-285, Eds. Kaplan, D., Artech House, Boston.
- MacMillan, D.S. and Ma, C.**, 1994. Evaluation of very long baseline interferometry atmospheric modeling improvements, *Journal of Geophysical Research*, **99**, 637-651.
- Marini, J.W.**, 1972. Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile, *Radio Science*, **7**, 223-231.
- McCarthy, D.D. (Ed.)**, 1996. IERS Conventions 1996, IERS Technical Note 21, Central Bureau of IERS-Observatoire de Paris, July, Paris.
<<http://maia.usno.navy.mil/conventions.html>>, 19 March 2001.
- Mendes, V.B. and Langley, R.B.**, 1994. A comprehensive analysis of mapping functions used in modelling tropospheric propagation delay in space geodetic data, *KIS94-International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy Geomatics and Navigation*, Banff, Alberta, August 30-September 2, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, 87-98.
<<http://www.unb.ca/GGE/Personnel/Langley.html>>, 19 March 2001.
- Mendes, V.B. and Langley, R.B.**, 1998. Optimisation of tropospheric delay mapping function performance for high-precision geodetic applications, *DORIS Days*, Toulouse, France, April 27-29.
<<http://www.unb.ca/GGE/Personnel/Langley.html>>, 19 March 2001.
- Nam, Y.S., Kuang, D. and Schutz, B.E.**, 1996. Comparison of GPS estimates of wet tropospheric delays with WVR measurements, *9th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, Kansas City, Missouri, USA, 641-646.

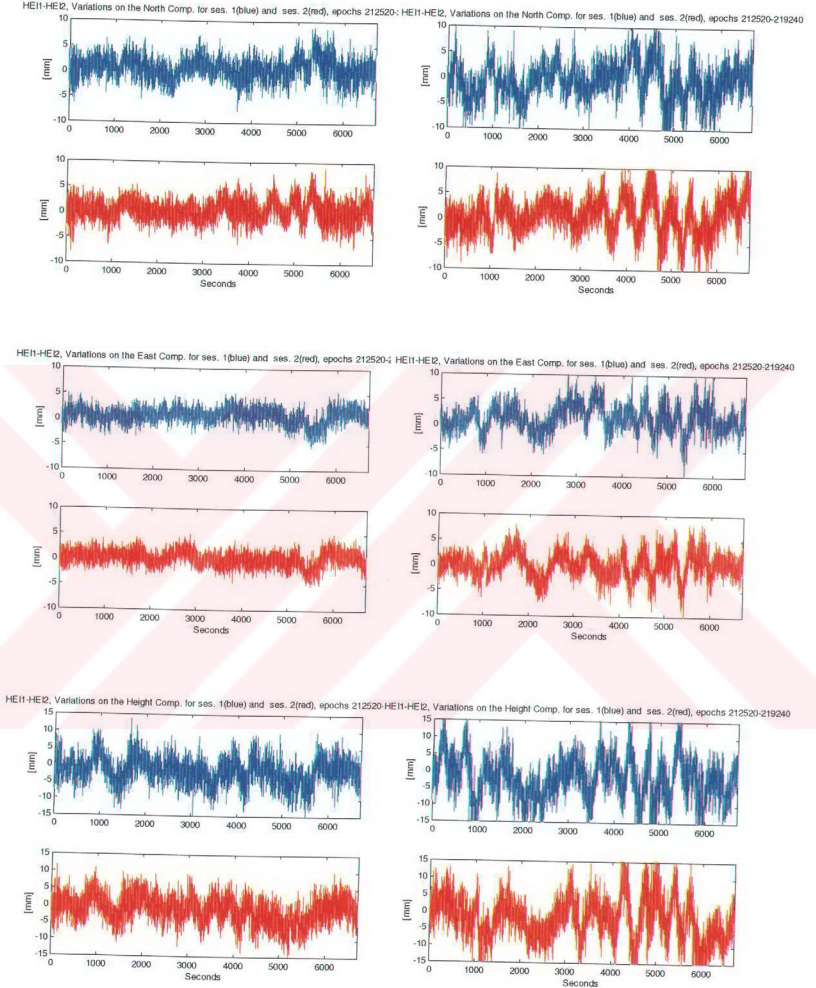
- NAVSTAR GPS**, 1995. Global Positioning System Standard Positioning Service Signal Specification, Second Edition, Department of Defense, USA. <<http://www.navcen.uscg.mil/pubs/gps/sigspec/default.htm>>, 19 March 2001
- Niell, A.E.**, 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research*, **101**, 3227-3246.
- NIMA**, 2000. Department of Defense World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships With Local Geodetic Systems, National Imagery and Mapping Agency, *Technical Report, No TR8350.2*, Third Edition. <<http://www.nima.mil/GandG/tr.html>>, 19 March 2001.
- NRC**, 1995. GPS Positioning Guide, Third Edition, National Resources Canada. <<http://www.geod.nrcan.gc.ca/products/html-public/GSDpublications/GPSguide/English/GPSGuideCover.html>>, 19 March 2001.
- Parkinson, B.W.**, 1996a. Introduction and heritage of NAVSTAR, the Global Positioning System, in *Global Positioning System: Theory and Applications*, **1**, pp. 3-28, Eds. Parkinson, B.W. and Spilker Jr., J.J., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC.
- Parkinson, B.W.**, 1996b. GPS error analysis, in *Global Positioning System: Theory and Applications*, **1**, pp. 469-483, Eds. Parkinson, B.W. and Spilker Jr., J.J., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC.
- Ray, J.K.**, 2000. Mitigation of GPS code and carrier phase multipath effects using a multi-antenna system, *PhD Thesis*, University of Calgary, Canada.
- Rizos, C.**, 1997. Principles and practice of GPS surveying, School of Geomatic Engineering, University of New South Wales, Australia.
- Rothacher, M., Springer, T.A., Schaer, S. and Beutler, G.**, 1998. Processing strategies for regional GPS networks, *IAG General Assembly 1997*, Rio de Janeiro, Brazil, 3-9 September 1997, IAG Symposia, pp. 93-100, Ed. Brunner, F.K., Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York.
- Saastamoinen, J.**, 1973. Contribution to the theory of atmospheric refraction, *Bulletin Géodésique*, **107**, 13-34.
- Satirapod, C. and Wang, J.**, 2000. Comparing the quality indicators of GPS carrier phase, *Geomatics Research Australasia*, **73**, 75-92. <http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/about/publications_year.htm>, 19 March 2001.

- Satirapod, C.**, 2001. Improving the accuracy of static GPS positioning with a new stochastic modelling procedure, *International Technical Meeting of the Satellite Division of the U.S. Institute of Navigation*, Salt Lake City, Utah, USA, September 11-14.
<http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/about/publications_year.htm>,
19 March 2001.
- Satirapod, C., Wang, J. and Rizos, C.**, 2001. A new stochastic modelling procedure for precise static GPS positioning, *Zeitschrift für Vermessungswesen*, **126**, 365-373.
<http://www.gmat.unsw.edu.au/snap/about/publications_year.htm>,
19 March 2001.
- Schaer, S., Beutler, G., Mervart, L., Rothacher, M. and Wild, U.**, 1995. Global and regional ionosphere models using the GPS double difference phase observables, *IGS Workshop*, Potsdam, Germany, May 15-17.
- Schaer, S., Beutler, G. and Rothacher, M.**, 1998. Mapping and predicting the ionosphere, *IGS AC Workshop*, Darmstadt, Germany, February 9-11.
- Shaw, M., Sandhu, K. and Turner, D.**, 2000. Modernization of the Global Positioning System, *GPS World*, **11**, No.9, 36-44.
- SOPAC**, 2001. *Site Coordinate Index*, Scripps Orbit and Permanent Array Center,
<<http://sopac.ucsd.edu/scripts/coordIndex.cgi>>, 29 October 2001.
- Spilker Jr., J.J.**, 1996a. GPS signal structure and theoretical performance, in *Global Positioning System: Theory and Applications*, **1**, pp. 57-120, Eds. Parkinson, B.W. and Spilker Jr., J.J., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC.
- Spilker Jr., J.J.**, 1996b. Tropospheric effects on GPS, in *Global Positioning System: Theory and Applications*, **1**, pp. 517-546, Eds. Parkinson, B.W. and Spilker Jr., J.J., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC.
- Spilker Jr., J.J. and Natali, F.D.**, 1996. Interference effects and mitigation techniques, in *Global Positioning System: Theory and Applications*, **1**, pp. 717-771, Eds. Parkinson, B.W. and Spilker Jr., J.J., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC.
- Teunissen, P.J.G. and Kleusberg, A.**, 1998, GPS observation equations and positioning concepts, in *GPS for Geodesy*, Second Edition, pp. 187-229, Eds. Teunissen, P.J.G. and Kleusberg, A., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Teunissen, P.J.G., Jonkman, N.F. and Tiberius, C.C.J.M.**, 1998. Weighting GPS dual frequency observations: bearing the cross of cross-correlation, *GPS Solutions*, **2**, No. 2, 28-37.

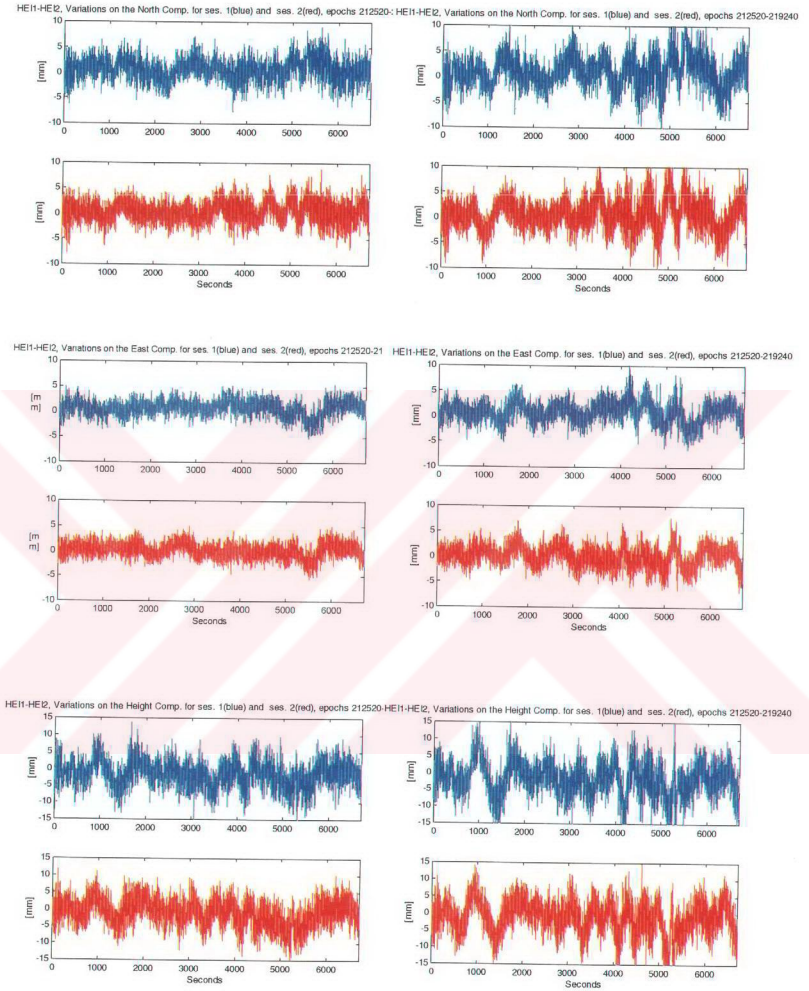
- Thayer, G.D.**, 1974. An improved equation for the radio refractive index of air, *Radio Science*, **9**, 803-807.
- Tiberius, C.C.J.M.**, 1999. The GPS data weight matrix: what are the issues?, *ION 1999 National Technical Meeting "Vision 2010: Present and Future"*, San Diego, California, USA, January 25-27, 219-227.
< <http://www.geo.tudelft.nl/mgp/>>, 19 March 2001.
- Tiberius, C.C.J.M., Jonkman, N. and Kenselaar, F.**, 1999. The stochastics of GPS observables, *GPS World*, **10**, No. 2, 49-54.
< <http://www.geo.tudelft.nl/mgp/>>, 19 March 2001.
- Tiberius, C.C.J.M. and Kenselaar, F.**, 2000. Estimation of the stochastic model for GPS code and phase observables, *Survey Review*, **35**, 441-454.
< <http://www.geo.tudelft.nl/mgp/>>, 19 March 2001.
- USNO**, 2002. *USNO NAVSTAR Global Positioning System*, US Naval Observatory, <<http://tycho.usno.navy.mil/gpsinfo.html>>, 31 July 2001.
- Van Dierendonck, A.J.**, 1995. Understanding GPS receiver terminology: a tutorial, *GPS World*, **6**, No. 1, 34-44.
- Van Dierendonck, A.J.**, 1996. GPS receivers, in *Global Positioning System: Theory and Applications*, **1**, pp. 329-407, Eds. Parkinson, B.W. and Spilker Jr., J.J., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC.
- Wang, J., Stewart, M.P. and Tsakiri, M.**, 1998. Stochastic modeling for static GPS baseline data processing, *Journal of Surveying Engineering*, **124**, 171-181.
- Ward, P.**, 1996. GPS satellite signal characteristics, in *Understanding GPS Principles and Applications*, pp. 83-117, Ed. Kaplan, E.D., Artech House Publishers.
- Weill, L.R.**, 1997. Conquering multipath: the GPS accuracy battle, *GPS World*, **8**, No. 4, 59-66.
- Wells, D.E., Beck, N., Delikaraoglou, D., Kleusberg, A., Krakiwsky, E.J., Lachapelle, G., Langley, R.B., Nakiboglu, M., Schwarz, K.P., Tranquilla, J.M. and Vanicek, P.**, 1986. Guide to GPS positioning, Canadian GPS Associates, Fredericton, New Brunswick.
- Wiederholt, L.F. and Kaplan, E.D.**, 1996. GPS system segments, in *Understanding GPS Principles and Applications*, pp. 59-81, Ed. Kaplan, E.D., Artech House Publishers.
- Yan, H. and Ping, J.**, 1995. The generator function method of the tropospheric refraction coefficients, *The Astronomical Journal*, **110**, 934-939.

- Yan, H.**, 1998. Improvement of astronomical refraction by mapping function, *Chinese Astronomy and Astrophysics*, **22**, 487-496.
- Zhang, J.**, 1999. Investigations into the estimation of residual tropospheric delays in a GPS network, *MSc Thesis*, University of Calgary, Canada.
<<http://www.ensu.ucalgary.ca/GradTheses.html>>, 19 March 2001.

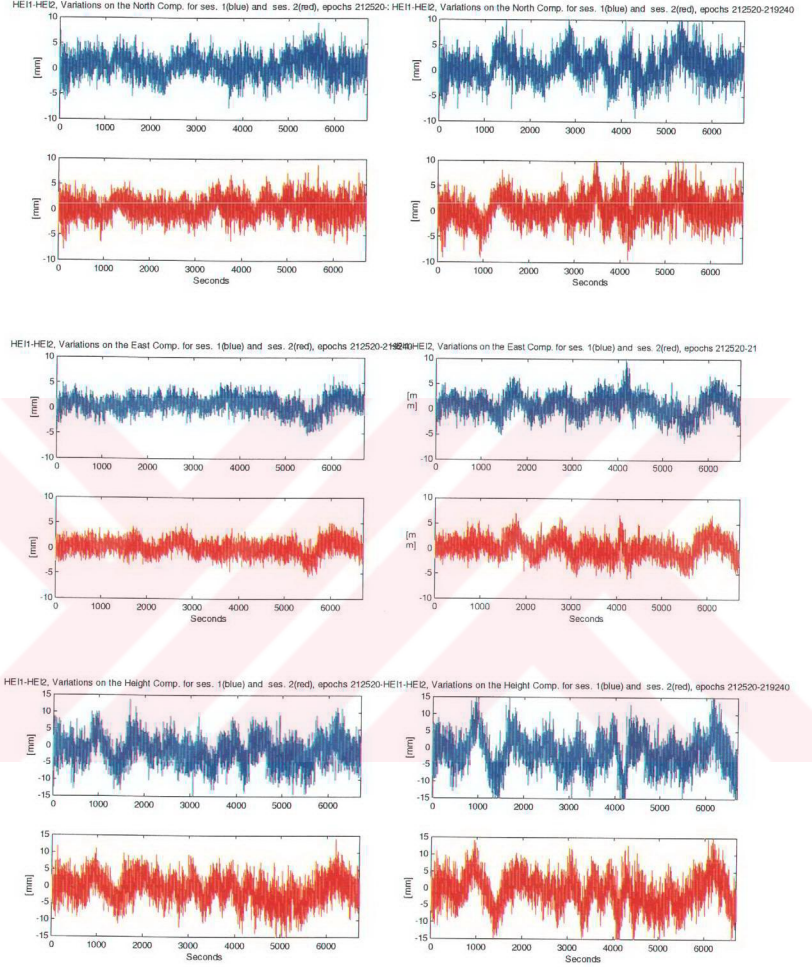
EK A



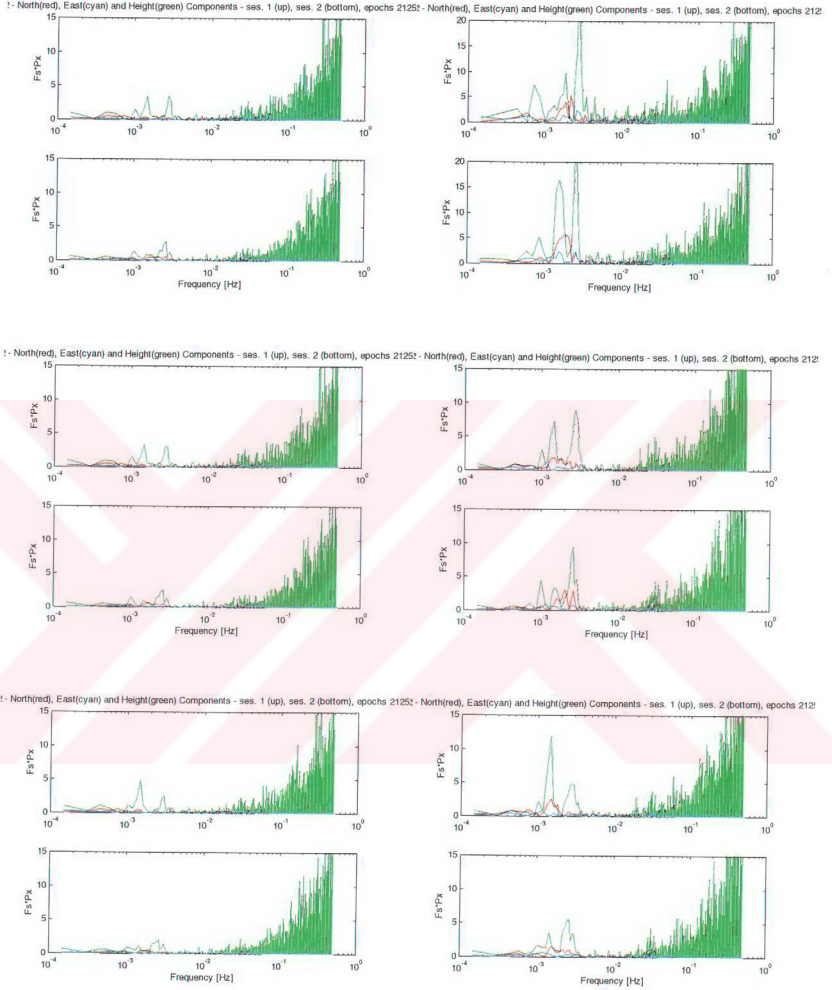
Şekil A.1: HEI2 istasyonunun kuzey (üst), doğu (orta) ve yükseklik (alt) bileşeni, birinci oturum (mavi), ikinci oturum (kırmızı) ilk sütun: Sigma- ϵ modeli ve 5° eğim açısı ile çözüm ikinci sütun: Eş-ağırlık modeli ve 5° eğim açısı ile çözüm HEI1-HEI2 baz kenarı



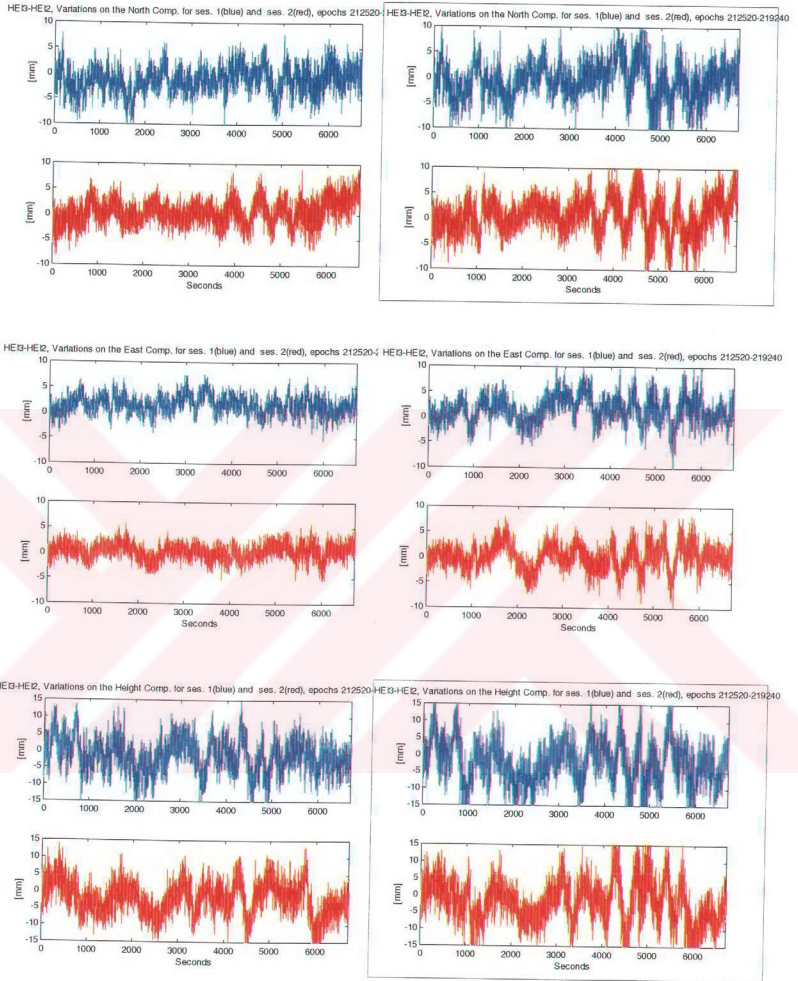
Şekil A.2: HEI2 istasyonunun kuzey (üst), doğu (orta) ve yükseklik (alt) bileşeni, birinci oturum (mavi), ikinci oturum (kırmızı) ilk sütun: Sigma- ϵ modeli ve 10° eğim açısı ile çözüm ikinci sütun: Eş-ağırlık modeli ve 10° eğim açısı ile çözüm HEI1-HEI2 baz kenarı



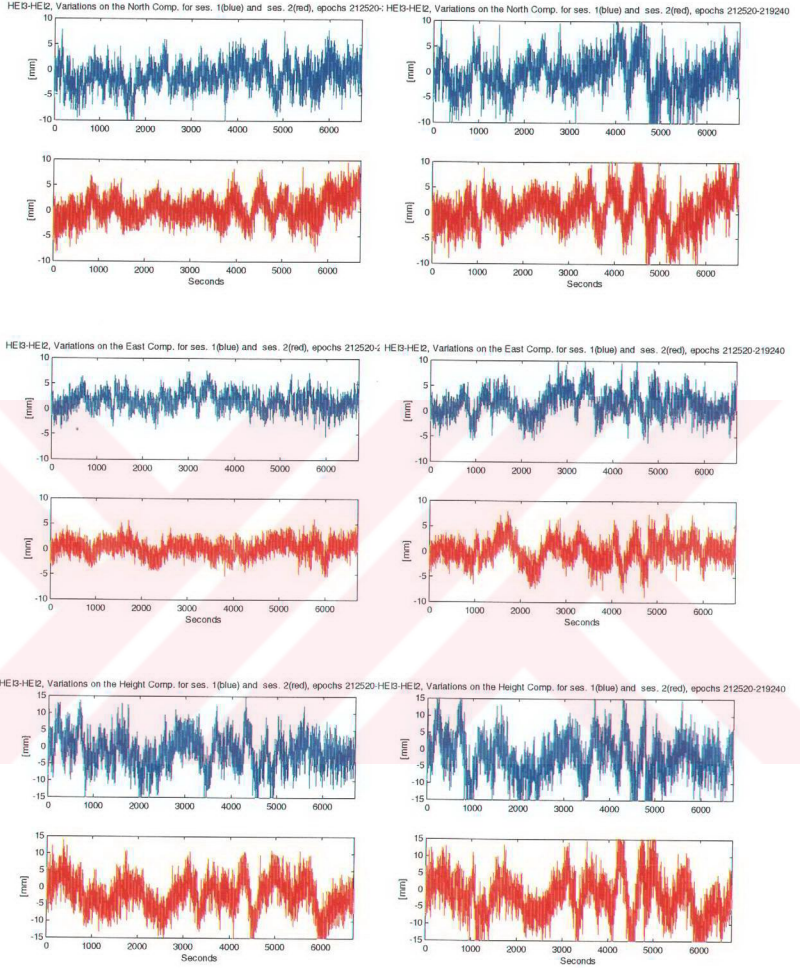
Şekil A.3: HEI2 istasyonunun kuzey (üst), doğu (orta) ve yükseklik (alt) bileşeni, birinci oturum (mavi), ikinci oturum (kırmızı)
 ilk sütun: Sigma- ϵ modeli ve 15° eğim açısı ile çözüm
 ikinci sütun: Eş-ağırlık modeli ve 15° eğim açısı ile çözüm
 HEI1-HEI2 baz kenarı



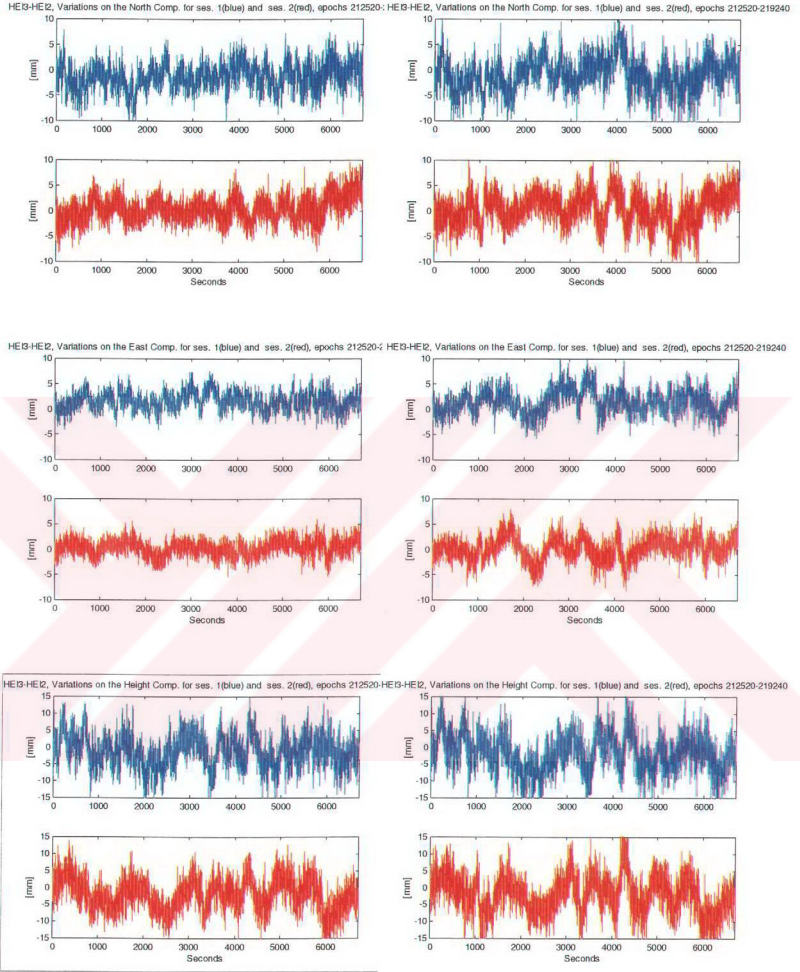
Şekil A.4: HEI2 istasyonunun epok-epok koordinatları için spektral güç yoğunluğu, birinci (üst) ve ikinci (alt) oturum, HEI1-HEI2 baz kenarı birinci sütun: Sigma- ϵ modeli ile çözüm ikinci sütun: Eş ağırlık modeli ile çözüm üst sıra: 5° eğim açısı ile çözüm orta sıra: 10° eğim açısı ile çözüm alt sıra: 15° eğim açısı ile çözüm



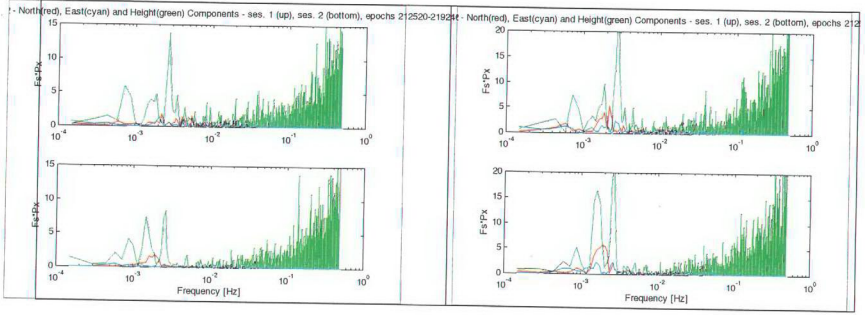
Şekil A.5: HEI2 istasyonunun kuzey (üst), doğu (orta) ve yükseklik (alt) bileşeni, birinci oturum (mavi), ikinci oturum (kırmızı) ilk sütun: Sigma- ϵ modeli ve 5° eğim açısı ile çözüm ikinci sütun: E- σ ağırlık modeli ve 5° eğim açısı ile çözüm HEI3-HEI2 baz kenarı



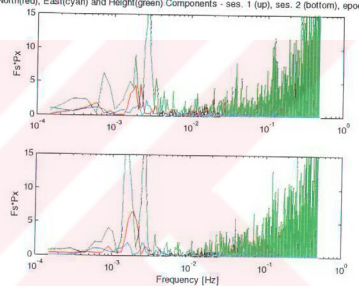
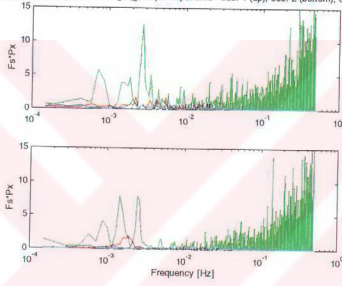
Şekil A.6: HE12 istasyonunun kuzey (üst), doğu (orta) ve yükseklik (alt) bileşeni, birinci oturum (mavi), ikinci oturum (kırmızı)
 ilk sütun: Sigma- ϵ modeli ve 10° eğim açısı ile çözüm
 ikinci sütun: Eş-ağırlık modeli ve 10° eğim açısı ile çözüm
 HE13-HE12 baz kenarı



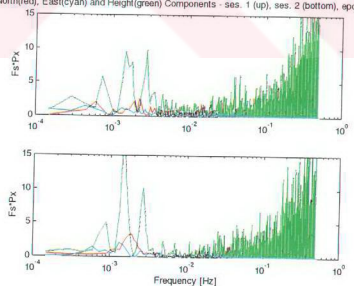
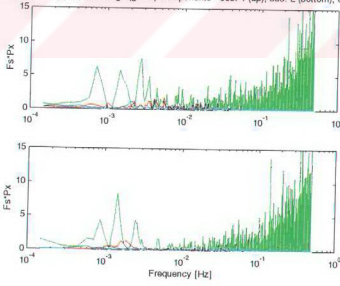
Şekil A.7: HEI2 istasyonunun kuzey (üst), doğu (orta) ve yükseklik (alt) bileşeni, birinci oturum (mavi), ikinci oturum (kırmızı)
 ilk sütun: Sigma- ϵ modeli ve 15° eğim açısı ile çözüm
 ikinci sütun: Eş-ağırlık modeli ve 15° eğim açısı ile çözüm
 HEI3-HEI2 baz kenarı



1: North(red), East(cyan) and Height(green) Components - ses. 1 (up), ses. 2 (bottom), epochs 21251- North(red), East(cyan) and Height(green) Components - ses. 1 (up), ses. 2 (bottom), epochs 21251

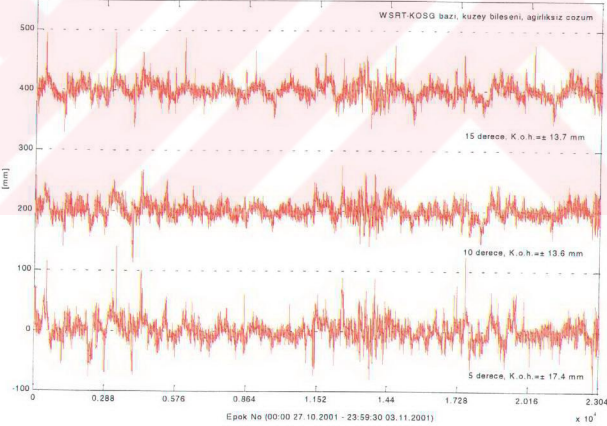
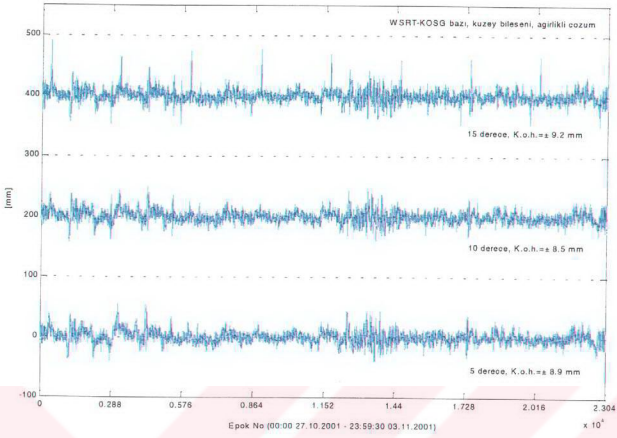


1: North(red), East(cyan) and Height(green) Components - ses. 1 (up), ses. 2 (bottom), epochs 21251- North(red), East(cyan) and Height(green) Components - ses. 1 (up), ses. 2 (bottom), epochs 21251

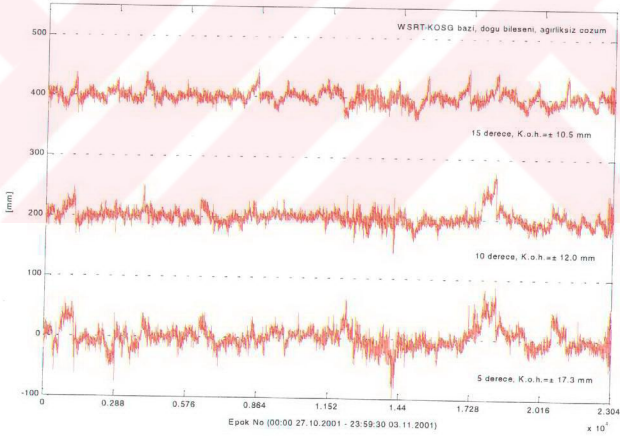
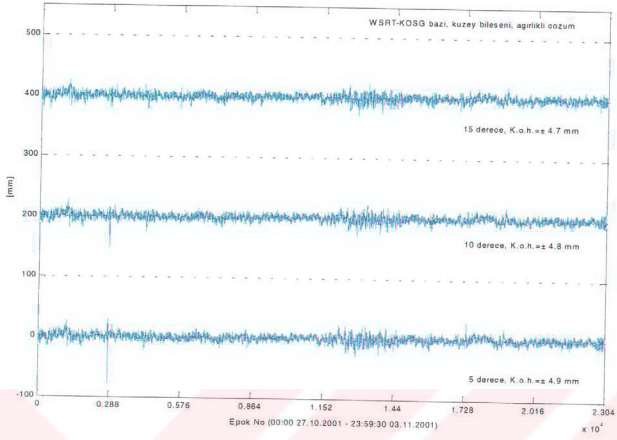


Şekil A.8: HEI2 istasyonunun epok-epok koordinatları için spektral güç yoğunluğu, birinci (üst) ve ikinci (alt) oturum, HEI3-HEI2 baz kenarı
 birinci sütun: Sigma- ϵ modeli ile çözüm
 ikinci sütun: Eş ağırlık modeli ile çözüm
 üst sıra: 5° eğim açısı ile çözüm
 orta sıra: 10° eğim açısı ile çözüm
 alt sıra: 15° eğim açısı ile çözüm

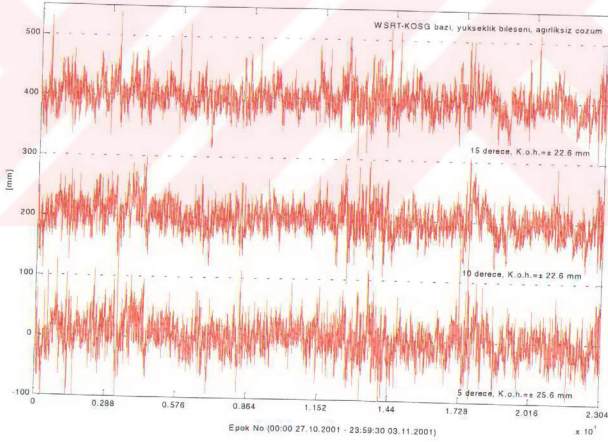
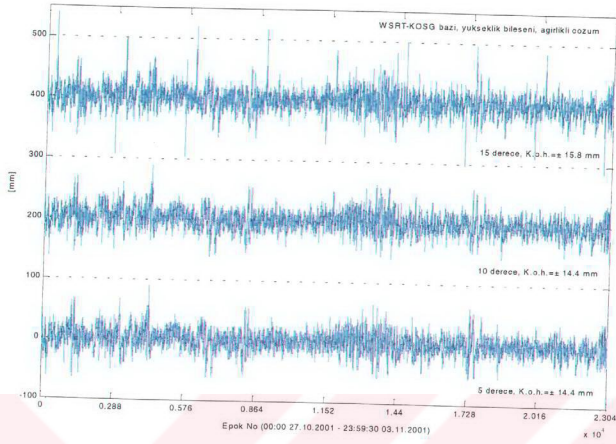
EK B



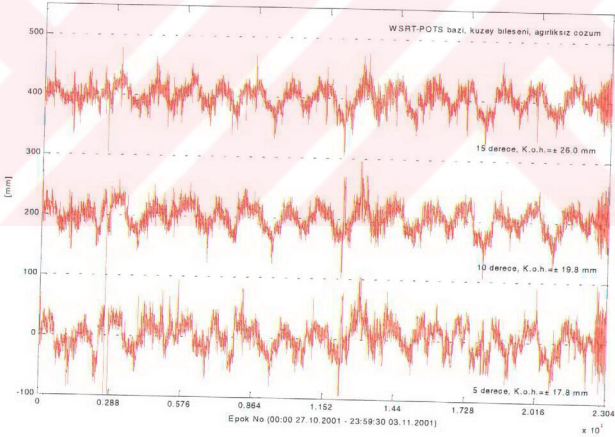
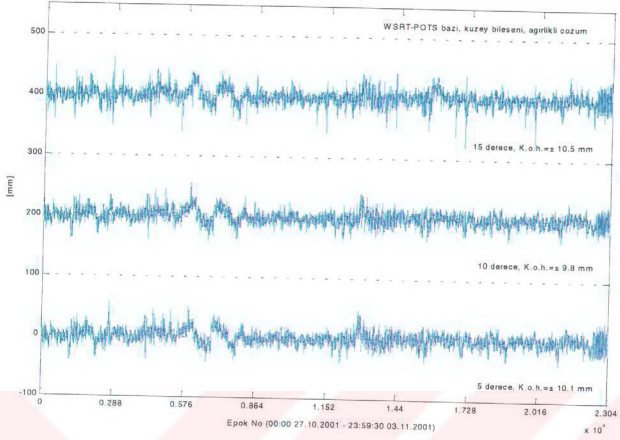
Şekil B.1: KOSG istasyonunun kuzey bileşeni, WSRT-KOSG baz kenarı ağırlıklı (mavi) ve eş ağırlıklı (kırmızı) çözüm ilk satır: 15° eğim açısı, ikinci satır: 10° eğim açısı, üçüncü satır: 5° eğim açısı ile çözüm



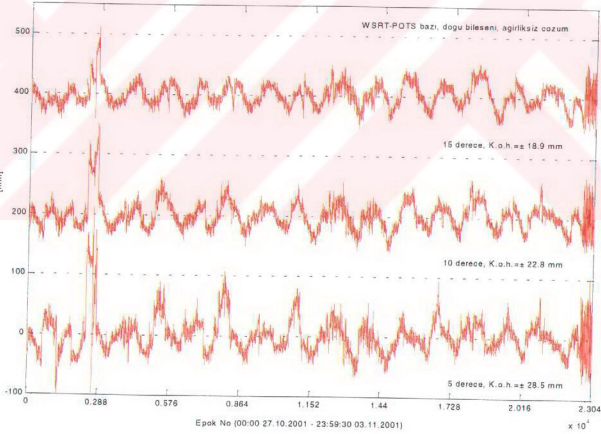
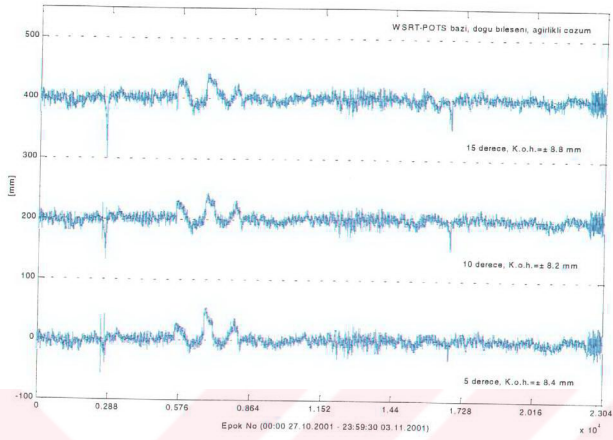
Şekil B.2: KOSG istasyonunun doğu bileşeni, WSRT-KOSG baz kenarı ağırlıklı (mavi) ve eş ağırlıklı (kırmızı) çözüm ilk satır: 15° eğim açısı, ikinci satır: 10° eğim açısı, üçüncü satır: 5° eğim açısı ile çözüm



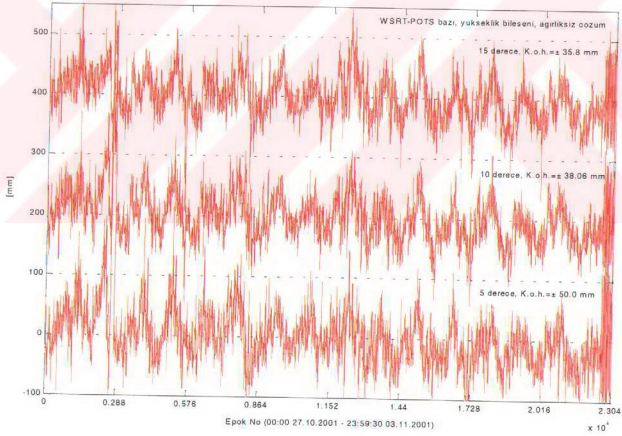
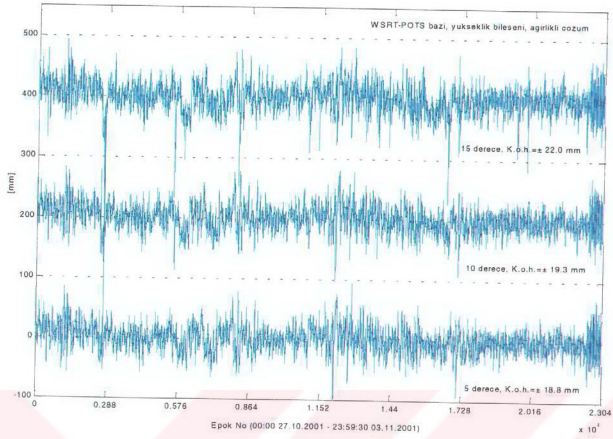
Şekil B.3: KOSG istasyonunun yükseklik bileşeni, WSRT-KOSG baz kenarı ağırlıklı (mavi) ve eş ağırlıklı (kırmızı) çözüm ilk satır: 15° eğim açısı, ikinci satır: 10° eğim açısı, üçüncü satır: 5° eğim açısı ile çözüm



Şekil B.4: POTS istasyonunun kuzey bileşeni, WSRT-POTS baz kenarı ağırlıklı (mavi) ve eş ağırlıklı (kırmızı) çözüm ilk satır: 15° eğim açısı, ikinci satır: 10° eğim açısı, üçüncü satır: 5° eğim açısı ile çözüm



Şekil B.5: POTS istasyonunun doğu bileşeni, WSRT-POTS baz kenarı ağırlıklı (mavi) ve eş ağırlıklı (kırmızı) çözüm
 ilk satır: 15° eğim açısı, ikinci satır: 10° eğim açısı,
 üçüncü satır: 5° eğim açısı ile çözüm



Şekil B.6: POTS istasyonunun yükseklik bileşeni, WSRT-POTS baz kenarı ağırlıklı (mavi) ve eş ağırlıklı (kırmızı) çözüm
 ilk satır: 15° eğim açısı, ikinci satır: 10° eğim açısı,
 üçüncü satır: 5° eğim açısı ile çözüm

İTİP FİZİKSEL ÇÖZÜM MERKEZİ

ÖZGEÇMİŞ

M. Tevfik Özlüdemir, 19.09.1969 tarihinde Bolu'da doğdu. İlk ve orta öğrenimini Mudurnu'da tamamladıktan sonra Ankara Tapu ve Kadastro Meslek Lisesi'nde başladığı lise öğrenimini 1986 yılında tamamladı. Aynı yıl başladığı İstanbul Teknik Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü'nden 1990 yılında mezun oldu. 1993 yılında aynı bölümde yüksek lisans eğitimini tamamladı. Çalışmalarını 1997-1999 yılları arasında Graz Teknik Üniversitesi'nde konuk araştırmacı olarak sürdürdü. 1991 yılından bu yana İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Jeodezi Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.