

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

GNSS ANTENLERİNİN KALİBRASYONU

SÜREYYA ÖZGÜR UYGUR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
HARİTA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEOMATİK PROGRAMI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. V. ENGİN GÜLAL**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GNSS ANTENLERİNİN KALİBRASYONU

Süreyya Özgür UYGUR tarafından hazırlanan tez çalışması 31.07.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

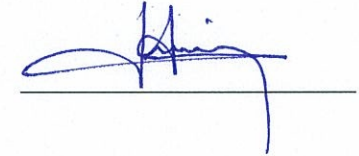
Doç. Dr. V. Engin GÜLAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. V. Engin GÜLAL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Halil ERKAYA
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Taşkın KAVZOĞLU
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü



ÖNSÖZ

“GNSS Antenlerinin Kalibrasyonu” isimli bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Çalışma süresince bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, maddi ve manevi her konuda yardımlarını gördüğüm, tez danışmanım ve değerli hocam sayın Doç. Dr. V. Engin GÜLAL’a teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam süresince benimle yakından ilgilenen, abiliklerini benden esirgemeyen ve bu çalışmada büyük emekleri olan Arş. Gör. Dr. N. Onur AYKUT’a ve Arş. Gör. Dr. Burak Akpınar’a teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, değerli zamanlarını bana ayıran Doç. Dr. Cüneyt AYDIN’a, Yrd. Doç. Dr. Niyazi ARSLAN’a ve Arş. Gör. Dr. Bahattin ERDOĞAN’a teşekkürü bir borç bilirim.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca yardımlarını benden esirgemeyen değerli arkadaşım Arş. Gör. E. Simay ATAYER’e teşekkürü bir borç bilirim.

Haziran, 2012

Süreyya Özgür UYGUR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	4
1.3 Hipotez.....	4
BÖLÜM 2	
METROLOJİ VE KALİBRASYON	5
2.1 Uluslararası Metroloji ve Kalibrasyon Organizasyonu	7
2.2 Ulusal Metroloji ve Kalibrasyon Organizasyonu	9
BÖLÜM 3	
GNSS SİNYAL, ANTEN VE ALICI YAPISI	12
3.1 GNSS Sinyal Yapısı.....	12
3.1.1 GPS Sinyal Yapısı	12
3.1.2 GLONASS ve GALILEO Sinyal Yapısı	16
3.2 GNSS Anten Yapısı	18
3.2.1 Elektromanyetik Işıma ve Radyo İletişimi	18
3.2.2 GNSS Antenlerinin Özellikleri ve Performans Gereksinimleri	20
3.2.2.1 Antenlerin Polarizasyonu	21
3.2.2.2 Antenlerin Eksenel Oranı	24
3.2.2.3 Antenlerin Kazanç Modeli	25
3.2.2.4 Antenlerin Empedansı.....	25
3.2.2.5 Antenlerin Rezonans Frekansı	26

3.2.2.6	Voltaj Durağan Dalga Oranı (VSWR)	26
3.2.2.7	Işıma Modeli	27
3.2.2.8	Frekans Kapsamı / Bant Genişliği	27
3.2.2.9	Düşük Gürültü Ön Yükseltici (Low Noise Preamplifier)	28
3.2.2.10	Anten Yer Düzlemi (Ground Plane)	29
3.2.3	GNSS Anten Seçim Ölçütleri	30
3.2.4	GNSS Anten Tipleri	30
3.3	GNSS Alıcı Yapısı	31
BÖLÜM 4		
GNSS GÖZLEMLERİ VE HATA KAYNAKLARI		36
4.1	Kod Ölçüleri	36
4.2	Taşıyıcı Faz Ölçüleri	37
4.3	GNSS İle Konumlama Yöntemleri	38
4.3.1	Bağıl Konumlama	39
4.3.2	Fark Gözlemleri	39
4.3.2.1	Tekli Fark	39
4.3.2.2	İkili Farklar	40
4.3.2.3	Üçlü Farklar	41
4.3.3	Statik Göreli Konumlama	41
4.4	GNSS İle Konulamada Hata Kaynakları	42
4.4.1	İyonosferik Etkiler	43
4.4.2	Troposferik Etkiler	44
4.4.3	Uydu Saat Hataları	44
4.4.4	Uydu Efemeris Hataları	45
4.4.5	Multipath (Çok Yolluluk) Hatası	46
4.4.6	Taşıyıcı Dalga Faz Başlangıç Belirsizliği ve Faz Kesiklikleri	47
4.4.7	Uydu Anteni Faz Merkezi Değişimi	49
4.4.8	Alıcı Anteni Faz Merkezi Değişimi	49
BÖLÜM 5		
GNSS ANTENLERİNİN KALİBRASYONU		51
5.1	Anten Faz Merkezi ve Değişimi	51
5.2	Kalibrasyon Yöntemleri	55
5.2.1	Bağıl Kalibrasyon Yöntemi	55
5.2.2	Mutlak Kalibrasyon Yöntemi	57
5.3	Matematiksel Modeller	61
5.4	Kalibrasyon Dosya Formatları	63
5.4.1	NGS / Eski IGS Formatı	63
5.4.2	ANTEX Formatı	64
5.4.3	Geo++ Formatı	65
BÖLÜM 6		
UYGULAMA: ANTEN KALİBRASYONU		66
6.1	Wa1/Kalib 2.0 Yazılımı	69
6.2	Değerlendirmeler	71
6.2.1	Wa1/Kalib İle Değerlendirmeler	72
6.2.1.1	Faz Merkezi Ötelemesi Bileşenleri	72
6.2.1.2	Yükseklik Açısına Bağlı Faz Merkezi Değişimleri	73

6.2.1.3	Yükseklik ve Azimut Açısına Bağlı Faz Merkezi Değişimleri....	74
6.2.2	CCANTEX/CCANT İle Değerlendirme	78
6.2.2.1	Sonuçların NGS Değerleri ile Karşılaştırılması.....	79
6.2.2.2	Sonuç Dosyalarının Birleştirilmesi	82
6.2.2.3	ANTEX Dosyalarının İç Karşılaştırması	86
6.2.3	Wa1/Kalib ve CCANTEX Uygulama Sonuçlarının Yorumlanması .	88
BÖLÜM 7		
ANTEN PARAMETRELERİNİN AĞ ÇÖZÜMLERİNE ETKİSİ.....		91
7.1	Anten Kalibrasyon Modellerinin Uzun Bazlara Etkisi	91
7.1.1	500 Km'ye Kadar Baz Çözümleri	92
7.1.2	Farklı Anten Türleri İçeren Global Ağ Çözümü	97
7.1.3	Aynı Anten Türleri İçeren Global Ağ Çözümü	98
7.2	Anten Kalibrasyon Modellerinin Kısa Bazlara Etkisi	99
BÖLÜM 8		
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....		104
KAYNAKLAR		107
EK-A		
WA1 BAZ ÇÖZÜM SONUÇLARI		111
EK-B		
FMO DEĞERLERİNİN İÇ KARŞILAŞTIRILMASI.....		122
ÖZGEÇMİŞ.....		126

SİMGE LİSTESİ

$\underline{a}$	Anten referans noktasına göre faz merkezi ötelemesi vektörü
$\underline{b}_{AB}$	A ve B arasındaki baz vektörü
d_{ION}	İyonosferik hata
d_{TROP}	Troposferik hata
d_{MP}	Çok yolluluk hatası
d_{FMD}	Faz merkezi hatası
$dr(\alpha, \beta)$	Faz merkezi hatasının ölçülen uzunluğa etkisi
dt	Alıcı saat hatası
dT	Uydu saat hatası
d_{TIDE}	Karasal gelgit ve okyanus yüklemeleri
$d\phi(\alpha, \beta)$	Doğrultuya bağımlı faz merkezi değişimi
f	Frekans
l_{ϕ}	Faz sinyali için doğrusallaştırılmış gözlem denklemi
N	Tamsayı belirsizliği
E_{major}	Polarizasyon elipsinin büyük eksen
E_{minor}	Polarizasyon elipsinin küçük eksen
P_{nm}	Normalleştirilmiş bütünleşik legendre fonksiyonu
R_r^s	s uydusu ile r alıcısı arasındaki pseudo-uzaklık
r_o	Uydu yönündeki birim vektör
$\underline{X}$	Konum vektörü
x	Kısaltılmış istasyon koordinatları
$\nabla \Delta \delta^{SID}$	Yıldız günü ikili farkları
Δ^{ION}	İyonosferik etki
δ^{SID}	Yıldız gün farkları
λ	Dalga boyu
ε_{ϕ}	Faz gürültüsü
Φ	Faz ölçüsü
ρ	Alıcı ile uydu arasındaki geometrik uzaklık

KISALTMA LİSTESİ

AOAD/M_T	Alan Osborne Associates
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AFM	Anten Faz Merkezi
ANTEX	Antenna Exchange Format
AR	Axial Ratio
ARN	Anten Referans Noktası
AS	Anti Spoofing
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
CDMA	Code Division Multiple Access
CORS	Continuously Operating Reference Stations
CGPM	Conference Generale des Poids et Mesures
CIPM	Comite International des Poids et Mesures
DC	Direct Current
EUREF	Reference Frame Sub Commission for Europe
EUROMET	European Association of National Metrology Institutes
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FMO	Faz Merkezi Ofseti
FMD	Faz Merkezi Değişimi
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HGK	Harita Genel Komutanlığı
HOW	Hand Over Word
IGS	International GNSS Service
IF	Intermediate Frequency
İKÜ	İstanbul Kültür Üniversitesi
İSKİ	İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
İTÜ	İstanbul Teknik Üniversitesi
KOH	Karesel Ortalama Hata
LHCP	Left Hand Circular Polarization
LNA	Low Noise Amplifier
MPR	Multipath Ratio
NGS	National Geodetic Service
NMI	National Metrology Institute
NWA	Network Analyser
PRN	Pseudo Random Noise
RF	Radio Frequency

RHCP	Right Hand Circular Polarization
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTK	Real Time Kinematic
SA	Selective Availability
SBAS	Satellite Based Augmentation System
SLR	Satellite Laser Ranging
TKGM	Tapu Kadastro Genel Müdürlüğü
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TUSAGA	Gerçek Zamanlı Türkiye Ulusal Sabit GNSS Ağı
TÜRKAK	Türk Akreditasyon Kurumu
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
UKBS	Uydularla Konum Belirleme Sistemi
UME	Ulusal Metroloji Enstitüsü
VLBI	Very Long Baseline Interferometry
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio
YTÜ	Yıldız Teknik Üniversitesi

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	Metrolojinin sınıflandırılması 6
Şekil 2. 2	Metre konvansiyonu düzenlemesi 8
Şekil 2. 3	İzlenebilirlik zinciri 8
Şekil 2. 4	UME genel görünüş 10
Şekil 2. 5	TÜBİTAK-UME ve uluslararası ilişkiler..... 10
Şekil 3. 1	Taşıyıcı dalga ikili faz modülasyonu 13
Şekil 3. 2	Elektromanyetik spektrum 18
Şekil 3. 3	Dalga modeli 19
Şekil 3. 4	Düzlem dalga ve polarizasyon elipsi..... 21
Şekil 3. 5	Sağ el dairesel polarizasyona sahip elektromanyetik dalga 22
Şekil 3. 6	Polarizasyon türleri 23
Şekil 3. 7	Basit bir alıcı yapısı..... 32
Şekil 3. 8	Tek kanallı genel bir GPS alıcısının temel parçaları..... 33
Şekil 4. 1	Taşıyıcı dalga faz gözlemi 37
Şekil 4. 2	GNSS ile konumlama yöntemleri 38
Şekil 4. 3	Fark gözlemleri 41
Şekil 4. 4	Statik göreli konumlama 42
Şekil 4. 5	GNSS hata kaynakları 42
Şekil 4. 6	Çok yolluluk etkisi 46
Şekil 4. 7	Taşıyıcı dalga faz başlangıç belirsizliği 48
Şekil 5. 1	GNSS anteni faz merkezi tanımı 52
Şekil 5. 2	Faz merkezi değişiminin gösterimi 53
Şekil 5. 3	Anten faz merkezi ofseti ve faz merkezi değişimi 53
Şekil 5. 4	Ofset belirleme ve yalnızca FMO düzeltmesi problemi 54
Şekil 5. 5	NGS anten kalibrasyon test alanı 56
Şekil 5. 6	Mutlak kalibrasyon robotları (Hannover Üniversitesi) 58
Şekil 5. 7	Ekosuz oda kalibrasyon ölçüm düzeneği 60
Şekil 5. 8	Ekosuz oda (Bonn Üniversitesi)..... 60
Şekil 5. 9	NGS formatı 63
Şekil 5. 10	Eski IGS formatı 64
Şekil 5. 11	ANTEX formatı başlık bölümü..... 64
Şekil 5. 12	ANTEX FMO ve FMD değerleri 65
Şekil 5. 13	Geo ++ formatı..... 65
Şekil 6. 1	Anten kalibrasyon bazı..... 66
Şekil 6. 2	Referans anteninin kalibrasyon raporu..... 67
Şekil 6. 3	Referans anteni (Ashtech AeroAntenna Technology) 68
Şekil 6. 4	YTÜ Davutpaşa kalibrasyon istasyonları..... 69

Şekil 6. 5	Wa1 program girdileri	70
Şekil 6. 6	Wa1ANT program girdileri.....	71
Şekil 6. 7	FMO L1 kuzey bileşenleri	72
Şekil 6. 8	FMO L1 doğu bileşenleri	72
Şekil 6. 9	FMO L1 yükseklik bileşenleri	72
Şekil 6. 10	FMO L2 kuzey bileşenleri	73
Şekil 6. 11	FMO L2 doğu bileşenleri	73
Şekil 6. 12	FMO L2 yükseklik bileşenleri	73
Şekil 6. 13	Yükseklik açısına bağlı L1 faz merkezi değişimi	74
Şekil 6. 14	Yükseklik açısına bağlı L2 faz merkezi değişimi	74
Şekil 6. 15	Azimut ve yükseklik açısına bağlı 1. ve 2. Set FMD grafikleri.....	75
Şekil 6. 16	Azimut ve yükseklik açısına bağlı 3. ve 4. Set FMD grafikleri.....	75
Şekil 6. 17	Azimut ve yükseklik açısına bağlı 5. ve 6. Set FMD grafikleri.....	75
Şekil 6. 18	Azimut ve yükseklik açısına bağlı 7. ve 8. Set FMD grafikleri.....	76
Şekil 6. 19	Azimut ve yükseklik açısına bağlı 9. ve 10. Set FMD grafikleri.....	76
Şekil 6. 20	Azimut ve yükseklik açısına bağlı 1. ve 2. Set FMD grafikleri.....	76
Şekil 6. 21	Azimut ve yükseklik açısına bağlı 3. ve 4. Set FMD grafikleri.....	77
Şekil 6. 22	Azimut ve yükseklik açısına bağlı 5. ve 6. Set FMD grafikleri.....	77
Şekil 6. 23	Azimut ve yükseklik açısına bağlı 7. ve 8. Set FMD grafikleri.....	77
Şekil 6. 24	Azimut ve yükseklik açısına bağlı 9. ve 10. Set FMD grafikleri.....	78
Şekil 6. 25	NGS karşılaştırması L1 kuzey bileşeni (mm)	79
Şekil 6. 26	NGS karşılaştırması L1 doğu bileşeni (mm).....	79
Şekil 6. 27	NGS karşılaştırması L1 yükseklik bileşeni (mm)	80
Şekil 6. 28	NGS karşılaştırması L2 kuzey bileşeni (mm)	80
Şekil 6. 29	NGS karşılaştırması L2 doğu bileşeni (mm).....	80
Şekil 6. 30	NGS karşılaştırması L2 yükseklik bileşeni (mm)	80
Şekil 6. 31	L1 sinyali FMO kuzey bileşenleri karşılaştırması	87
Şekil 6. 32	L1 sinyali FMO doğu bileşenleri karşılaştırması	87
Şekil 6. 33	L1 sinyali FMO yükseklik bileşenleri karşılaştırması	87
Şekil 6. 34	L2 sinyali FMO kuzey bileşenleri karşılaştırması	87
Şekil 6. 35	L2 sinyali FMO doğu bileşenleri karşılaştırması	88
Şekil 6. 36	L2 sinyali FMO yükseklik bileşenleri karşılaştırması	88
Şekil 7. 1	CORS-TR noktaları ile oluşturulan üçgen şeklindeki ağlar.....	93
Şekil 7. 2	Anten dosyası seçiminin yüksekliğe etkisi	96
Şekil 7. 3	Farklı anten tiplerini içeren global ağ	97
Şekil 7. 4	Aynı anten tiplerini içeren global ağ	98
Şekil 7. 5	İSKİ-UKBS noktalarını içeren yerel ağ	99

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3. 1	GPS uydu sinyal bileşenleri..... 14
Çizelge 3. 2	L1, L2 ve doğrusal kombinasyonları..... 16
Çizelge 3. 3	GNSS uydu sinyal bileşenleri..... 17
Çizelge 3. 4	GNSS uydu frekansları..... 28
Çizelge 4. 1	Efemeris hataları nedeniyle ölçülen kenarlardaki hata oranları 46
Çizelge 6. 1	Ölçüm bilgileri..... 69
Çizelge 6. 2	FMO bileşenleri için NGS karşılaştırma sonuçları 81
Çizelge 6. 3	Kombinasyonlara ilişkin FMO değerleri (yükseklik açısı 0°)..... 83
Çizelge 6. 4	Kombinasyonlara ilişkin FMO değerleri (yükseklik açısı 10°)..... 83
Çizelge 6. 5	Kombinasyonların NGS ile karşılaştırılması (yükseklik açısı 0°)..... 83
Çizelge 6. 6	Kombinasyonların NGS ile karşılaştırılması (yükseklik açısı 10°).... 84
Çizelge 6. 7	(2005429663) seri numaralı antenin ilk üç set kombinasyonunun ortalama AFM'den farkları..... 84
Çizelge 6. 8	(2004468661) seri numaralı antenin iki set kombinasyonunun ortalama AFM'den farkları..... 84
Çizelge 6. 9	(2005429663) seri numaralı antenin son beş set kombinasyonunun ortalama AFM'den farkları..... 85
Çizelge 6. 10	(2005429663) seri numaralı antenin sekiz set kombinasyonunun ortalama AFM'den farkları..... 85
Çizelge 6. 11	Tüm setlerin kombinasyonunun ortalama AFM'den farkları..... 86
Çizelge 7. 1	Ağ çözümünde beraber kullanılacak dosyaların listesi 92
Çizelge 7. 2	Birinci ağ için bağıl AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar..... 93
Çizelge 7. 3	Birinci ağ için mutlak AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar 93
Çizelge 7. 4	İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları 94
Çizelge 7. 5	İkinci ağ için bağıl AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar 94
Çizelge 7. 6	İkinci ağ için mutlak AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar 94
Çizelge 7. 7	İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları 94
Çizelge 7. 8	Üçüncü ağ için bağıl AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar 95
Çizelge 7. 9	Üçüncü ağ için mutlak AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar 95
Çizelge 7. 10	İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları 95
Çizelge 7. 11	Dördüncü ağ için bağıl AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar..... 95
Çizelge 7. 12	Dördüncü ağ için mutlak AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar.. 96
Çizelge 7. 13	İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları 96
Çizelge 7. 14	İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları 97
Çizelge 7. 15	İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları 98
Çizelge 7. 16	İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları 98
Çizelge 7. 17	İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları 99

Çizelge 7. 18	PALA noktası 164. GPS günü için ağ çözüm sonuçları.....	101
Çizelge 7. 19	PALA noktası 171. GPS günü için ağ çözüm sonuçları.....	101
Çizelge 7. 20	KCEK noktası 164. GPS günü için ağ çözüm sonuçları	102
Çizelge 7. 21	KCEK noktası 171. GPS günü için ağ çözüm sonuçları	102
Çizelge 7. 22	KCEK noktası için anten parametrelerinin sonuçlara etkisi.....	103
Çizelge 7. 23	PALA noktası için anten parametrelerinin sonuçlara etkisi	103
Çizelge 7. 24	PALA noktası için anten parametrelerinin sonuçlara etkisi	103
Çizelge Ek-A. 1	Birinci sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları.....	112
Çizelge Ek-A. 2	İkinci sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları.....	113
Çizelge Ek-A. 3	Üçüncü sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları	114
Çizelge Ek-A. 4	Dördüncü sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları	115
Çizelge Ek-A. 5	Beşinci sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları	116
Çizelge Ek-A. 6	Altıncı sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları.....	117
Çizelge Ek-A. 7	Yedinci sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları	118
Çizelge Ek-A. 8	Sekizinci sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları	119
Çizelge Ek-A. 9	Dokuzuncu sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları	120
Çizelge Ek-A. 10	Onuncu sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları	121
Çizelge Ek-B. 1	FMO karşılaştırması, [1-10]	122
Çizelge Ek-B. 2	FMO karşılaştırması, [2-10] ve [3-10]	123
Çizelge Ek-B. 3	FMO karşılaştırması, [4-10], [5-10] ve [6-10]	124
Çizelge Ek-B. 4	FMO karşılaştırması, [7-10], [8-10] ve [9-10]	125

GNSS ANTENLERİNİN KALİBRASYONU

Süreyya Özgür UYGUR

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. V. Engin GÜLAL

Günümüzde GNSS tekniği kullanılarak yüksek doğrulukta hassas konumlama yapmak mümkün olmaktadır. Özellikle yerkabuğu hareketlerinin izlenmesi, ulusal ve uluslararası referans ağlarının konumlarının belirlenmesi, mühendislik yapılarındaki deformasyonların belirlenmesinde hassas konumlamaya ihtiyaç duyulmaktadır. GNSS yöntemi ile yüksek doğruluk elde edebilmek ancak uygun ölçme yönteminin seçilmesi, hata kaynaklarının giderilmesi ve gözlemlerin uygun modeller yardımıyla değerlendirilmesi ile mümkün olmaktadır. Hassas konumlama için göz önünde bulundurulması gereken hata kaynaklarından biri de anten faz merkezi değişimidir. Anten faz merkezi değişimi uygun kalibrasyon yöntemleri kullanılarak belirlenmekte ve kullanıcıya sunulmaktadır. Bu çalışmada anten faz merkezi ve değişiminin belirlenmesine yönelik olarak yapılan araştırmalar ile sonuçları sunulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: GNSS, Hassas konumlama, Anten Faz Merkezi, Kalibrasyon.

ABSTRACT

CALIBRATION OF GNSS ANTENNAS

Süreyya Özgür UYGUR

Department of Geomatics Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. V. Engin GÜLAL

Today it is possible to make positioning with high accuracy by using GNSS. Precise positioning is required especially for the national and international reference networks, monitoring crustal movements and deformation of the engineering structures. Getting high accuracy observations through GNSS is only possible by choosing the correct measuring method, eliminating the error sources and using the suited models for evaluating the observations. One of the error sources that have to be considered for precise positioning is the antenna phase center variations. The antenna phase center variation is determined by using suitable calibration methods and then delivered to the user. This issue includes the research and the results for defining the antenna phase center and determining level of variation.

Key words: GNSS, precise positioning, antenna phase center, calibration.

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

1.1 Literatür Özeti

1980’li yıllarda ortaya çıkan GPS sistemi ile jeodezik amaçlı hassas konum belirleme çalışmaları, geçmişten günümüzde başarı ile gerçekleştirilmektedir. Teknolojideki ilerlemelerle beraber GPS sistemi teknik, yöntem ve değerlendirme algoritmaları ile sürekli olarak geliştirilmiştir.

Günümüzde GPS’e ilave olarak GLONASS (Rusya), GALILEO (AB), Beidou/Compass (Çin), QZSS (Japonya) uydu konumlama sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler SBAS adı verilen uydu bazlı sistemler (WAAS, EGNOS, MSAS, GAGAN vb.) ile desteklenmektedir. Uydu konumlama sistemleri ile uydu bazlı sistemlerin tamamına GNSS adı verilmektedir [1].

GNSS sistemi uydulardan yayınlanan, çeşitli bilgilerle modüle edilmiş radyo dalgalarının yeryüzündeki alıcılarla kaydedilmesiyle uydu ile alıcı arasındaki uzaklığın belirlenmesi temeline dayanır. Bir yer noktasından en az dört uyduya olan uzaklıklar ölçülerek uzay geriden kestirme yöntemiyle noktanın yermekezli üç boyutlu koordinatları ve GNSS alıcı saat hataları hesaplanabilmektedir. [1], [2], [3] kaynaklarından GNSS sisteminin yapısı ve işleyişi ile ilgili genel bilgilere ulaşılabilir.

İletişim tekniklerindeki gelişmeler ve veri iletişiminin ucuzlaması gerçek zamanlı konum belirleme çalışmalarının önünü açmış, referans istasyonu ile gezici alıcı arasında mesafe kısıtlamasının olduğu klasik RTK uygulamaları yerini istasyonlar arasındaki mesafelerin 100 km’ye dayandığı Ağ RTK uygulamalarına bırakmıştır [4]. Yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi, ulusal ve uluslararası ağların kurulması ve sıklaştırılması

gibi çalışmaların yanı sıra mühendislik yapılarındaki deformasyonların izlenmesi de GNSS ile hassas konumlanmanın önem kazandığı alanlardır.

Uydu konumlama sistemindeki ilerlemeler sistemin sinyal, alıcı ve anten yapısının da bu gelişmelere paralel olarak geliştirilmesini gerektirmektedir. Sistemden en uygun verimin alınabilmesi için GNSS bileşenlerinin bir bütün olarak ele alınması gerekmektedir. Uydu sinyalleri GNSS alıcı anteni tarafından alınır. Alıcı antenin görevi elektromanyetik dalgaları alıcıda işlenecek elektrik akımına dönüştürmektir. Antenlerin performansını etkileyen ve tasarımlarında göz önünde bulundurulacak faktörler Langley tarafından [5] ve [6]'da detaylı biçimde anlatılmıştır. GNSS alıcıları uydu sistemlerinin veri ve düzeltmelerini izleyip, kaydedip kullanabilen alıcılar olarak tanımlanır [1]. Alınan sinyalin işlenmesi, koordinat ve hız bilgisinin elde edilmesi alıcı tarafından gerçekleştirilir.

Tüm ölçme yöntemlerinin olduğu gibi GNSS sisteminin de zayıf tarafları mevcuttur. Günümüzde GNSS ile milimetre doğrulukla konum belirleme ancak uygun ölçme yönteminin seçilmesi, hata kaynaklarının uygun yöntem ve algoritmalarla giderilmesi veya modellenmesi ile mümkün olabilmektedir. GNSS gözlemlerinde hata kaynakları mesafeye bağımlı ve istasyon kaynaklı hatalar olarak ikiye ayrılabilir. Atmosferik etkiler ve uydulara ilişkin hatalar mesafeye bağlı hatalar olarak adlandırılabilir. Bunun yanında istasyon kaynaklı hatalar çok yolluluk, anten faz merkezi değişimi ve alıcı gürültüleridir.

GNSS ile hassas konumlama yapabilmek için anten faz merkezi modelleri göz önünde bulundurulmalıdır. GNSS antenlerinin faz merkezi sabit bir nokta değildir ve gelen uydu sinyalinin doğrultusuna göre değişir. Bu nedenle faz ölçülerindeki değişimleri hesaplamak amacıyla gerekli olan düzeltmeleri sağlamak için GNSS antenlerinin kalibrasyonu gereklidir. Bu konuda son yıllarda oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Faz merkezi değişiminin modellenmesinin sürekli gözlem yapan referans istasyon ağları gibi farklı alıcı ve anten tiplerinin kullanıldığı RTK uygulamalarında taşıyıcı dalga faz başlangıç belirsizliklerinin çözümünü az da olsa hızlandırdığı görülmüştür [7]. Bunun yanı sıra IGS ağ çözümlerinde faz merkezi düzeltmeleri içermeyen Dorne Margolin antenin referans olarak kullanılması IGS koordinat çözümlerinde ölçek problemine neden olmakla beraber istasyon yüksekliklerinde de sistematik hatalara neden olur [8], [9].

Antenlerin kalibrasyonunda farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlar bağıl ve mutlak kalibrasyon olarak ikiye ayrılır. Bağıl kalibrasyonlar ile test antenine ilişkin faz merkezi düzeltmeleri, koordinatları bilinen noktalar arasındaki kısa bir baz üzerinde Alan Osborne AOAD/M_T anteni referans alınarak toplanan GNSS verileri ile belirlenir [10]. Referans anteni faz merkezi değişimlerinin keyfi olarak 0 alınmasına ve işlemin sistematik hatalara neden olan diğer kısıtlamalarına rağmen bağıl düzeltmeler 2006 yılına kadar kullanılmıştır.

Mutlak kalibrasyonlar robot kalibrasyonlar ve ekosuz oda kalibrasyonları olarak ikiye ayrılır. Bu yöntemlerle düzeltmelerin referans antenine olan bağımlılığı ortadan kalkmıştır. İlk ekosuz oda ölçümleri Schupler tarafından [11]'de gösterilmiştir. Bu düzeltmeler kalibre edilen antenin döndürülmesine ve eğilendirilmesine olanak sağlayan robot ile kısa bir baz üzerinde gerçekleştirilen mutlak kalibrasyon sonuçlarıyla $\pm 1-2$ mm arasında oldukça iyi uyum göstermiştir [8]. Ancak bu değerlerin uygulanması global GPS çözümleri ile SLR ve VLBI çözümleri arasında 15 ppm'lik bir ölçek farkını ortaya çıkarmıştır. Araştırmalar sonucu bu farkın nedeninin uydu anteni faz merkezi modellerinin eksikliğinden kaynaklandığı ortaya çıkmıştır [8], [9].

Bağıl ve mutlak arazi yöntemlerinin yanında çoklu yansıma etkilerinden kaçınmak amacıyla ekosuz odada gerçekleştirilen mutlak laboratuvar yöntemi mevcuttur. Bu yöntemin en büyük dezavantajı, uygun ekosuz odanın tasarlanmasındaki zorluklardır [12]. Özel olarak tasarlanmış ekosuz odada GNSS sinyali yapay olarak üretilmekte ve tam karşısında bulunan kalibrasyonu gerçekleştirilecek anten kaydırılarak ve döndürülerek ölçüler yapılmaktadır [4].

“GNSS Antenlerinin Kalibrasyonu” konulu tez çalışması kapsamında YTÜ Harita Mühendisliği Bölümü Ölçme Tekniği Laboratuvarı bünyesinde bulunan iki farklı seri numaralı THALES anteninin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Yöntem olarak bağıl kalibrasyon yöntemi kullanılmıştır. Her bir kalibrasyon seti 24 saatlik dört oturumdan oluşmaktadır ve her yeni oturumda anten manuel döndürülerek, antene dört yöneltme verilmiştir. Mutlak kalibrasyonu Geo++ tarafından gerçekleştirilen Ashtech AeroAntenna Technology referans antenine bağlı olarak test anteninin parametreleri Wa1/Kalib yazılımı ile elde edilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Yüksek doğruluk gerektiren jeodezik ve jeodinamik amaçlı çalışmalarda, anten faz merkezi parametrelerinin göz ardı edilmesi özellikle yükseklik bileşeninde santimetre mertebelerine varan hatalara neden olmaktadır. Bu tez çalışmasında THA800961+REC anteninin, anten yöneltmesi içeren bağıl anten kalibrasyonu yöntemi ile mutlak kalibrasyonu gerçekleştirilmiş referans antenine göre kalibrasyon parametrelerinin belirlenmesi, bu parametrelerin tekrarlılığının, farklı disiplinler tarafından gerçekleştirilen kalibrasyon sonuçları ile tutarlılığının ve anten faz merkezi modellerinin baz çözümlerine olan etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

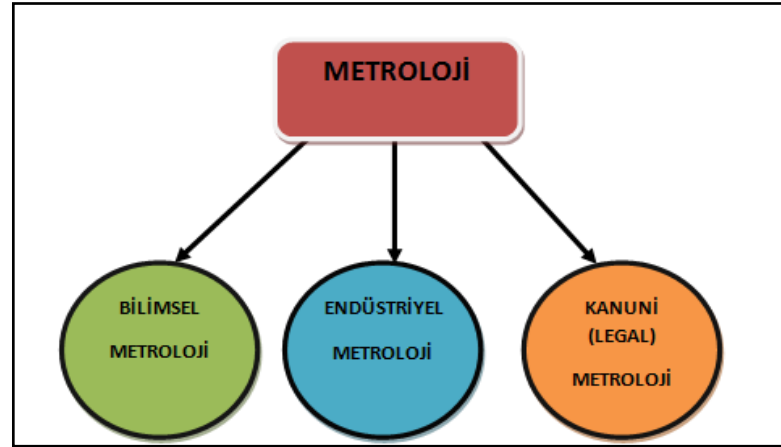
Bağıl kalibrasyon yöntemi ile arazide gerçek GNSS sinyalleri kullanılarak, bir referans antenine göre test anteninin kalibrasyonu gerçekleştirilir. Aynı tip antenlerin anten faz merkezlerinin teoride özdeş olması beklenir. Bu çalışmada THA800961+REC anteninin bağıl yöntemle kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Çeşitli hata kaynakları nedeniyle elde edilen parametrelerin birbirilerinden olan farkları ortaya konmuş, aynı türün farklı seri numaralı antenleri için sonuçlar elde edilmiştir.

BÖLÜM 2

METROLOJİ VE KALİBRASYON

Kalibrasyon sözcüğü dilimize Fransızca'dan girmiş bir sözcük olup bir ölçü aleti veya ölçme sisteminin gösterdiği veya bir ölçüt/ölçeğin ifade ettiği değerler ile, ölçülenin bilinen değerleri arasındaki ilişkiyi belli koşullar altında oluşturan işlemler dizisi olarak tanımlanır. Bir ölçümün izlenebilirliğini sağlamanın temel aracı, ölçüm cihazının veya ölçüm sisteminin kalibrasyonu veya referans malzemedir. Kalibrasyon, bir cihazın, sistemin veya referans malzemenin performans özelliklerini belirler. Bu, genellikle ölçüm standartları veya sertifikalı referans malzemeleri ile doğrudan karşılaştırma ile sağlanır. Kalibrasyon işleminde, kalibre edilen ölçü aletinin hata miktarı, kendisinden daha yüksek doğruluklu (en az 3 kat), bir ölçü aleti referans alınarak belirlenir. Kalibrasyonda referans alınan ölçü alet(ler)inin kalibrasyon sertifikası üzerinden ulusal veya uluslararası temel referanslara izlenebilir olması gerekir. Böylelikle kalibre edilen ölçü aletinin de temel referanslara izlenebilirliği sağlanmış olur. Kalibrasyon işlemi bir deneysel çalışma olup, deneysel bir çalışmadan beklenen tüm gereklilikler karşılanmalıdır. Yani çalışmalar kontrollü bir ortamda, özenli ve yazılı çalışma alışkanlığına sahip eğitimli kişilerce yapılmalı, çalışmanın yapıldığı ortam özellikleri, kullanılan donanım, uygulanan yöntem, ölçüm belirsizliği ve sonuçlar kalibrasyon raporunda belirtilmelidir. Kalibrasyon sonucu ölçü aletinin hatasının, kullanıldığı işlem veya varsa ilgili standartlarda belirtilen limitlerin dışına çıktığı belirlenmişse bu hatanın ayarlanarak giderilmesine çalışılır. Ancak ayar sonrası kalibrasyonun tekrarlanması ve son durumun raporlanması zorunludur. Ölçü aletleri, ölçüm prensip ve teknolojileri ile kullanım şartlarına bağlı olarak zamanla yaşlanırlar, bu nedenle belirli periyotlarla kalibrasyonun tekrarlanması gerekir. Söz konusu periyotlar deneyimli kullanıcılar tarafından cihaz özellikleri ve kullanım koşulları göz önüne alınarak belirlenmelidir. Kalibrasyonun, kalite yönetim sistemlerinin bir beklentisi olmasının nedeni, işletmeler

için bir ihtiyaç olmasındandır. Eğer işletme içinde bir büyüklüğü ölçme ihtiyacı varsa, orada kullanılan ölçü aletinin istenilen doğrulukta ölçüm yapıp yapmadığının belirlenmesi ihtiyacı da vardır. Ölçüm cihazlarından elde edilen hatalı ölçüm sonuçları zaman, iş gücü ve en önemlisi de itibar kaybına neden olur. Doğru ve güvenilir ölçme faaliyetleri bilimsel, ticari, ahlaki ve sosyal boyutları olan ve sağlanamaması durumunda ailevi, toplumsal, bölgesel, ulusal ve uluslararası ilişkileri olumsuz yönde etkileyecek ölçüde öneme sahiptir. Bilimsel ve teknolojik alanlarda yapılan araştırma, geliştirme ve uygulamalar toplumların yaşamakta olduğu coğrafik şartlar, beklentiler gelenekler, görenekler ve benzeri birçok unsurdan etkilenecek ülkelere özgü ölçüm cihazları ve sistemlerin oluşumunda etkili olmuştur. Bu yönü ile incelediğimizde ölçüm sistemine bağlı faaliyetler ulusal düzeyde uyumlu olmasına rağmen uluslararası ilişkilerde karışıklıklara neden olmuştur. Uluslararası alanda bilimsel, teknolojik ve ticari faaliyetlerde paralelliğin sağlanması amacı ile SI (Uluslararası Birim Sistemi) kabul edilmiş olup seviyesine ve sahasına bakmaksızın ölçme ile ilgili her türlü faaliyet, bir bilim dalı olan metroloji kavramı ile tanımlanmıştır. Metroloji kısaca ölçme bilimi olarak tanımlanır. Metroloji; bilimsel, endüstriyel ve kanuni (yasal) metroloji olarak üç dalda uygulanmaktadır.



Şekil 2. 1 Metrolojinin sınıflandırılması

Bilimsel metroloji; uluslararası geçerliliği olan birincil standartların ülke düzeyinde oluşturulması ile ilgili faaliyetleri kapsamaktadır. Ülkemizde bu konuda TUBİTAK bünyesinde hizmet veren Ulusal Metroloji Enstitüsü görevlendirilmiştir. Endüstriyel metroloji; bilimsel metrolojinin faaliyetleri sonucu elde edilen birincil standartlara izlenebilirliği sağlanmış ikincil standartlarla endüstride kullanılan izleme ve ölçme cihazlarının kalibrasyonlarının yapıldığı hizmet alanını kapsar. 132 sayılı kuruluş kanunu ile TSE endüstriyel alanda kalibrasyon hizmetlerinin yürütülmesi konusunda

görevlendirilmiştir. Kanuni (yasal) metroloji; ticarete esas teşkil eden ölçü ve kontrol aletlerinin kalibrasyonları ile ilgilenir. Bu kategoriye giren tüm cihazlar mecburi olarak kalibre ettirilmek zorundadır. Ülkemizde 3516 sayılı kanun ile T.C. Sanayi ve Ticaret Bakanlığı bu konuda görevlendirilmiştir [13].

Bir cihazın kalibre edilmesini gerektiren ana nedenler şunlardır [14]:

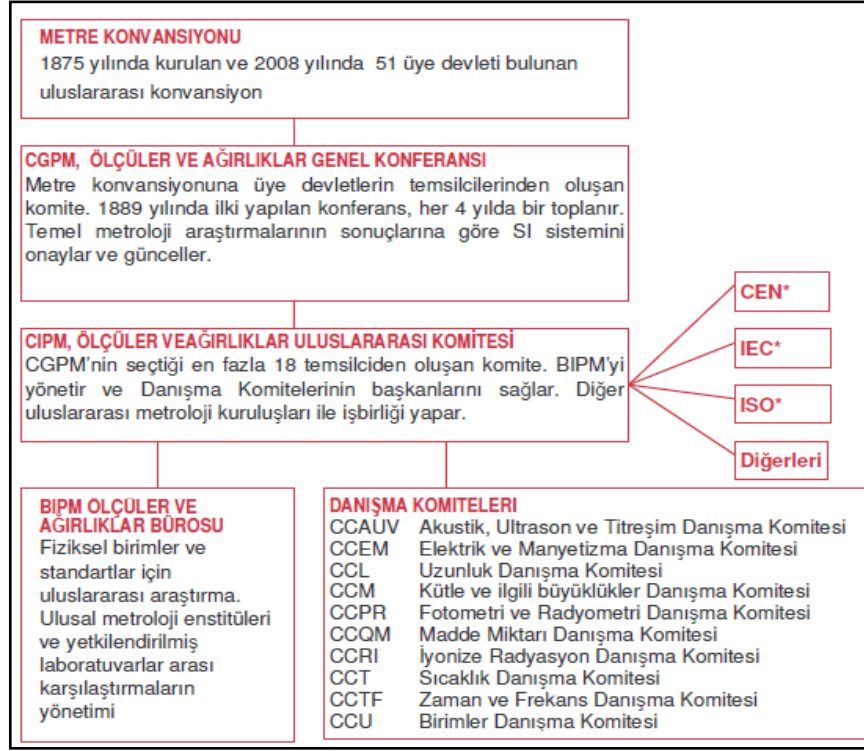
1. İzlenebilirliği oluşturmak ve göstermek
2. Cihazdan alınan değerlerin diğer ölçümlerle tutarlı olmasını sağlamak
3. Cihazdan alınan değerlerin doğruluğunu belirlemek
4. Cihazın güvenilirliğini belirlemek

2.1 Uluslararası Metroloji ve Kalibrasyon Organizasyonu

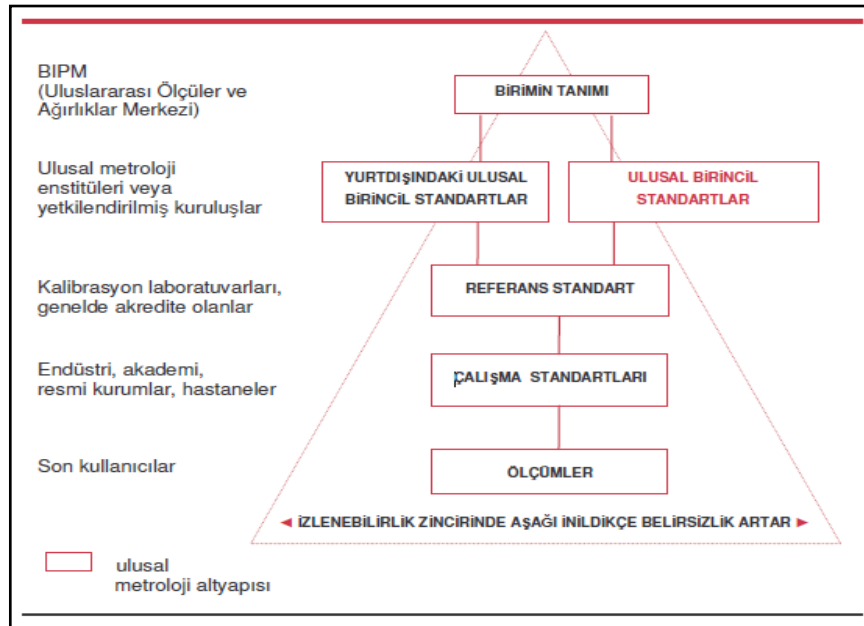
Uluslar arası metroloji ve kalibrasyon organizasyonu dört sınıftan oluşur [13]:

1. **CGPM:** Metre konvansiyonunun en üst karar organıdır. Üye ülkelerin delegelerinden oluşur ve en az altı yılda bir toplanır.
2. **CIPM:** CGPM'deki katılımcı delegeler arasından seçilen 18 kişilik uzmanların oluşturduğu bir organ olup CGPM'de alınan genel kararların pratik uygulama ölçütlerini tayin ederler. En az iki yılda bir toplanırlar.
3. **BIPM:** Merkezi Fransa'da bulunan uluslararası metroloji enstitüsüdür. Yaklaşık 50 çalışanı olan bu kuruluşun başlangıçtaki amacı fiziksel birimlerin realizasyonu için prototip geliştirmek ve üye ülkelere hizmet sunmaktır. Ancak günümüzde bu kuruluş, üye ülkelerin metroloji enstitülerinde elde edilen fiziksel birimlere ait standartların döngülü karşılaştırılma faaliyetlerini organize eden idari bir kuruluş halini almıştır.
4. **NMI:** Ulusal Metroloji Enstitüleri, CGPM tarafından karara bağlanmış fiziksel birimleri gerçekleştirmek ve bunları BIPM'nin kapsamındaki uluslar arası karşılaştırmalara dahil ederek elde edilen etalonunun (standartın) birincil seviye bir standart olmasının ve dolayısıyla izlenebilirliğin sağlanabilmesi için kurulmuş ulusal seviyede kuruluşlardır. Ölçüm işlemlerinde uluslararası düzeyde güvenilir ve kabul edilir ölçüm sonuçlarını elde edebilmenin yolu yine bu konuda uluslar arası kuralları uygulaması ile sağlanabilir. Bu kuralların temeli ise; izlenebilirlik ve döngülü karşılaştırmalardır.

Metre Konvansiyonu; doğru ve güvenilir bir ölçme sistemi, ölçme organizasyonu ve farklı seviyeleri belirlemek, ülkeler arasındaki farklı uygulamaları ortadan kaldırmak ve aynı fiziksel büyüklüğü aynı birimle veya eşleştirilebilir birimlerle ölçmeyi sağlayacak kararlar almak ve bunları uygulamak üzere 1875 yılında, Paris’te 17 devlet tarafından “Metre Konvansiyonu” imzalanmıştır.



Şekil 2. 2 Metre konvansiyonu düzenlemesi [14]



Şekil 2. 3 İzlenebilirlik zinciri [14]

Metrolojik izlenebilirlik; bir ölçüm sonucunun, her biri ölçüm belirsizliğine katkıda bulunan kalibrasyonlardan oluşan kesintisiz bir zincir aracılığı ile belirli bir referansa ilişkilendirilebilme özelliğine verilen isimdir. Diğer bir deyişle izlenebilirlik zinciri; her birinin belirsizliği ifade edilmiş kesintisiz bir karşılaştırmalar zinciridir [14]. Bu, bir ölçüm sonucunun veya bir standardın değerinin daha yüksek seviyedeki referanslarla ilişkilendirilmesini sağlar. En üst seviyede birincil standart bulunur.

2.2 Ulusal Metroloji ve Kalibrasyon Organizasyonu

Başbakanlık, 14 Ocak 1982 yılında, “Kamu ve özel sektörün ihtiyaçlarına topluca cevap verecek, birincil seviyede ve ulusal ölçekte” bir metroloji merkezinin kurulmasına karar vermiş ve fizibilite çalışmalarını yürütmek üzere TÜBİTAK’ı görevlendirmiştir. Başbakanlık, TÜBİTAK tarafından hazırlanan fizibilite çalışmasının bütün ilgili kuruluşlar tarafından uygun bulunması üzerine, 1984 yılında Merkez’in kurulması için TÜBİTAK’ı görevlendirmiştir. 1986 yılında “Milli Fizik ve Teknik Ölçme Standartları Merkezi” kurulmuş ve ilk laboratuvarlar aynı yıl Ağustos ayında faaliyete geçmiştir. 11 Ocak 1992’de TÜBİTAK Bilim Kurulu kararıyla, Milli Fizik ve Teknik Ölçme Standartları Merkezi, Marmara Araştırma Merkezi bünyesinde Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) statüsüne dönüştürülmüş ve faaliyetlerine devam etmiştir. 1 Ocak 1997 tarihinde UME TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi’nden ayrılmış ve doğrudan TÜBİTAK Başkanlığı’na bağlı olarak faaliyetlerini yürütmeye başlamıştır.

TÜBİTAK-UME’nin temel görevi; ulusal ölçüm standartlarını oluşturmak ve uluslararası izlenebilirliğini sağlamak, ülkemizde yapılan ölçümleri güvence altına almak, Türkiye’nin bilimsel ve teknolojik gelişimine katkıda bulunmak, ölçüm teknikleri, kalibrasyon yöntemleri ve temel metroloji alanlarında uluslararası düzeyde araştırma ve geliştirme çalışmalarına katılmak, yeni ölçüm teknikleri geliştirmek, metroloji konusunda uluslararası kuruluşlar nezdinde Türkiye’yi temsil etmek, Türk endüstriyel ürünlerinin kalitesini artırmak için gerekli Ulusal Metroloji Sistemi’nin kurulmasına katkıda bulunmak ve uluslararası ticarette karşılaşılan teknik engellerin aşılmasında sanayiye gerekli teknik desteği sağlamaktır.



Şekil 2. 4 UME genel görünüş [15]

TÜBİTAK UME, CIPM, EURAMET gibi uluslararası metroloji organizasyonları tarafından, uluslararası alanda kalibrasyon ve ölçüm sonuçlarının geçerliliğinin izlenmesi ve oluşturduğu standartların diğer ülkelerin standartları ile denkliliğini belirlemek amacıyla düzenlenen laboratuvarlar arası karşılaştırma veya yeterlik deney programlarına katılır. BIPM tarafından takip edilen karşılaştırmalar ve sonuçları BIPM veri tabanında yer almaktadır.

TÜBİTAK UME ölçümlerin izlenebilirliklerini, uluslararası ölçüm sistemine uyumunu sağlayan ve uluslararası düzeyde söz sahibi bir kurum haline gelmiştir. TÜBİTAK UME ve Türk Akreditasyon Kurumu (TÜRKAK), 2009 yılında imzaladıkları bir protokolle, kalibrasyon ve deney laboratuvarlarının akreditasyonu ve bu laboratuvarlarda yapılan ölçümlerin izlenebilirliğinin sağlanması konusunda işbirliği yapmaktadır.



Şekil 2. 5 TÜBİTAK-UME ve uluslararası ilişkiler [15]

TÜBİTAK-UME tarafından verilen hizmetler; kalibrasyon, deney, eğitim, referans ölçüm standartları tasarlamak, geliştirmek ve üretmek, metrolojik cihaz tasarımı ve üretimi, sanayiye yönelik metrolojik Ar-Ge faaliyetleri yapmak, danışmanlık, cihaz bakımı ve onarımı, uluslararası ve ulusal karşılaştırmalar ve yeterlilik deneyleri düzenlemek, sanayiye yönelik yönlendirici yayınlar yapmak olarak sıralanabilir.

GNSS SİNYAL, ANTEN VE ALICI YAPISI

3.1 GNSS Sinyal Yapısı

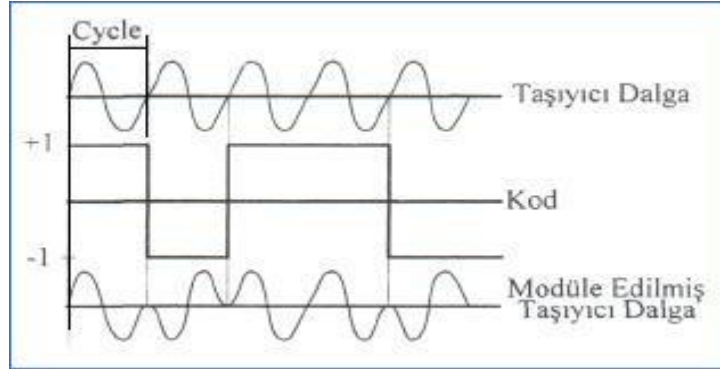
GNSS tek yönlü bir konumlama sistemidir. GNSS alıcıları ve uyduları kendi saatlerini içerirler ve bu saatler birbiri ile çok iyi senkronize olmalıdır. Bu senkronizasyon sinyaller aracılığıyla gerçekleştirilir ve üç yerine en az dört uyduya ihtiyaç duyulmasının nedeni bu senkronizasyon işlemidir. Uydu jeodezisi, verinin uydulardan kullanıcılara elektromanyetik dalgalar vasıtasıyla iletilmesi esasına dayanmaktadır. Elektromanyetik dalgalar salınımlı (alternatif) elektrik kuvveti tarafından oluşturulur. Diğer radyo sinyalleri gibi GNSS sinyalleri de uydulardan sinüzoidal dalgalar ya da taşıyıcılar olarak yayılırlar. Bu dalgaların sinüzoidal yayılımı Maxwell kanunlarına uymaktadır. Bu bölümde tez çalışmasında temel alınan GPS'in sinyal yapısı anlatılmış, GLONASS ve GALILEO sistemlerinin sinyal yapıları hakkında da kısaca bilgiler verilmiştir.

3.1.1 GPS Sinyal Yapısı

Uydulardaki osilatörler f_0 temel frekansını üretirler. L1 ve L2 ile gösterilen L bandındaki iki taşıyıcı sinyal bu f_0 temel frekansının tamsayı katları ile oluşturulur. Bu sinyallerin belirli bileşenleri mevcuttur. Bu bileşenlerin iletimi için yaklaşık 20 Mhz'lik bir bant genişliğine ihtiyaç duyular. GPS sisteminde yüksek frekans seçilerek iyonosfer etkisinin giderilmesi amaçlanır. İyonosfer radyo sinyallerinin yayılım hızlarını etkiler. Uydu ile alıcı arasındaki mesafe sinyalin ulaşım zamanının ölçülmesi ile belirlenir ve bu nedenle hatalar içerir. GPS uyduları sinyallerini iki frekans üzerinden iletir. Eğer iyi ayrılmış iki frekans üzerinde eş zamanlı gözlemler birleştirilirse hemen hemen tüm iyonosferik etki giderilebilir. Bununla beraber frekansın çok yüksek olması da

sakıncalıdır. Alınan uydu sinyali kullanılan frekans değeri büyüdükçe daha zayıf hale gelir. GNSS tarafından kullanılan L bant frekansları uzay (boşluk) kaybı ve iyonosferin bozucu etkisi ile uyuşmaktadır. L1 ve L2 taşıyıcıları alıcıya uydu saat okumalarını sağlamak ve yörünge parametreleri gibi bilgileri iletmek amacıyla kodlarla modüle edilmiştir. Bu PRN kodları ilk bakışta rastgele olarak seçilmiş gibi görünen sıfır ve birlerden oluşan ikili değer dizilerinden oluşur. PRN kodları "tapped feedback registers" adı verilen alıcı içerisindeki cihazlar tarafından özel algoritmalar ile üretilir.

Bu kod dizilerinin tam anlamıyla aynısı GPS alıcısı içerisinde de tekrarlanır. Bu tekrarlanan diziler alınan dizilerle hizalanarak, sinyalin uydudan iletiildiği zaman ve sinyal yayılma süresi bilindiğinden konum belirleme işlemi gerçekleştirilir. Her uydu kendi özgün kodunu oluşturur. Bu şekilde GPS alıcısı hangi sinyalin hangi uydudan geldiğini kolaylıkla ayırt edebilir. Kodlar 0 ve 1 ikili değerlerine karşılık gelen +1 ve -1 değerlerine sahip dizilerden oluşur. İkili faz modülasyonu adı verilen bu işlem kod durumunda bir değışiklik meydana geldiğinde taşıyıcı dalgada 180 derecelik bir kayıklık oluşturularak gerçekleştirilir (Şekil 3.1).



Şekil 3. 1 Taşıyıcı dalga ikili faz modülasyonu

Her uydudan iki farklı PRN kodu iletilir. Bunlar C/A kodu ve P kodudur. Bunlardan C/A kodu $f_0/10$ frekans değerine, 1023 bit (chip) uzunluğuna sahiptir ve her kod sonunda (1 milisaniyede bir) kendini tekrar eder. C/A kodunun dalga boyu yaklaşık olarak 300 metredir. C/A kodu her milisaniyede kendini tekrar ettiğinden GPS alıcısı sinyale kilitlenebilir ve alınan kodla alıcıda üretilen kodun eşleşmesine başlayabilir. Konumlamanın hassasiyeti PRN kodunu oluşturan çiplerin dalga boyu ile orantılıdır. Kısa dalga boyları daha yüksek hassasiyet elde edilmesini sağlar. Bu nedenle GPS uyduları aynı zamanda P kodunu yayınlar. P kodu f_0 frekans değerine sahiptir ve dalga boyu yaklaşık 30 metredir. P kodu fazlasıyla uzun bir dizidir. Kendini yaklaşık 266,4 günde bir tekrar eder. Her uyduya bu kodun bir haftalık özgün bölümü tahsis edilmiştir

ve bu da o uydunun PRN numarasını ifade etmektedir. Kodlar her GPS haftası başında (cumartesiye pazara bağlayan gece yarısı) tekrar etmektedir.

GPS PRN kodlarının yararlı özellikleri vardır. GPS alıcısı bir uydudan gelen sinyali işlerken diğer uydulardan eş zamanlı alınan sinyallerin bu sinyal ile karışmaması önemli bir konudur. GPS PRN kodları bu sinyal karışımını engellemek için özellikle seçilen kodlardır. Ayrıca PRN kodlarının kullanımı GPS sinyallerini diğer radyo sinyallerinin kasıtlı veya kasıtsız bozucu etkilerine karşı dayanıklı hale getirmektedir [16].

C/A kodu yalnızca L1 taşıyıcısı üzerine modüle edilmişken P kodu hem L1 hem de L2 taşıyıcıları üzerine modüle edilmiştir. W kodu A-S uygulandığında P kodunu Y kod olacak şekilde şifrelemek için kullanılır. Navigasyon mesajı 1500 bit uzunluğundadır ve 50 Hz frekansında 30 saniyede bir yayınlanır.

Çizelge 3. 1 GPS uydu sinyal bileşenleri [1]

Bileşen	Frekansı (MHz)	Dalga boyu (λ)
Temel frekans	$f_0=10,23$	
L1 sinyali	$154 \times f_0=1575,42$	$\approx 19,0$ cm
L2 sinyali	$120 \times f_0=1227,60$	$\approx 24,4$ cm
L5 sinyali	1176,45	25,48 cm
P kodu	$f_0=10,23$	29,3 m
C/A kodu	$f_0/10=1.023$	293 m
W kodu	$f_0/20=0,5115$	
Navigasyon mesajı	$f_0/204600=50,10^{-6}$	

Alıcı ve uydu arasında ölçülen mesafeden konum elde etmek için alıcılar uyduların konumlarını bilmelidir. Bu bilgi uydular tarafından yayınlanır. Navigasyon mesajı PRN kodları ile birlikte L1 ve L2 taşıyıcıları üzerine yerleştirilmiştir. Her uydu, konumlamada kullanılacak yörünge bilgisi (efemeris), uydu saat hataları, uydunun sağlık durumu gibi bilgileri içeren kendi mesajını yayınlar. Bu mesajın içerisinde aynı zamanda GPS uydu dizilimindeki diğer uydulara ilişkin almanak verisi de bulunur. Almanak verisi alıcıda her uydunun yaklaşık konumunu belirlemede kullanılır. Efemeris ve saat bilgilerinin belli bir kısmını kapsamaktadır. Almanak verisi GPS

alıcısının ilk açılma anında uydulara kilitlenebilmesi için ihtiyaç duyulan, doğruluğu oldukça düşük uydu koordinatlarını sağlar. Aynı zamanda GPS ölçü planlamalarında uydu görünürlük grafiklerinin çiziminde almanak verisine ihtiyaç duyulur.

Navigasyon mesajı P kodu kullanan alıcılar için önemli bir bilgi içerir. Daha önceden belirtildiği gibi P kodu her uyduya yedi gün uzunluğunda parçalar şeklinde tahsis edilmiştir. Başlangıçta saat senkronizasyonu yapılmamış bir GPS alıcısı gelen sinyali eşlemek için kendi P kodunu taramalıdır. Bu kodun bir saniyesinin taranması saatler sürebilir. Bu yüzden navigasyon mesajı içinde hand-over word (HOW) adı verilen, alıcıya P kodunun neresinden taramaya başlayacağı bilgisini veren özel bir kelime yollarır. Navigasyon mesajı 50 bit/saniyelik bir hıza sahiptir ve 25 sayfadan oluşan tüm mesajın yayınlanması için toplam 12,5 dakikalık bir süre gerekmektedir.

GPS sisteminde çift frekans kullanılmasının amaçları;

- L1 frekansının herhangi bir nedenle kesilmesi ya da elektronik karıştırmaya maruz kalması durumunda L2 frekansının yedek frekans görevi görmesi
- Çift frekans özelliğinden yararlanarak iyonosferik düzeltme olanağı sağlaması olarak sıralanabilir.

Bazı durumlarda temel taşıyıcı fazların veya kodların belirli doğrusal kombinasyonlarını oluşturmak kullanışlı olabilir. ϕ_1 ve ϕ_2 fazlarının doğrusal kombinasyonu n_1 ve n_2 katsayıları ile tanımlanır:

$$\phi = n_1 \phi_1 + n_2 \phi_2 \quad (3.1)$$

Doğrusal kombinasyonlarda fazlara ilişkin gürültü seviyesi daha yüksektir. Bununla beraber çeşitli hataları gidermek adına doğrusal kombinasyonlar kullanılır.

1. İyonosferden bağımsız doğrusal kombinasyon (L_3)
2. Geometriden bağımsız doğrusal kombinasyon (L_4)
3. Geniş aralık (wide-lane) doğrusal kombinasyon (L_5)
4. Melbourne-Wübbena doğrusal kombinasyonu (L_6)

L_3 doğrusal kombinasyonu kullanılarak iyonosferik gecikme sanal olarak elimine edilir. L_4 doğrusal kombinasyon çözümü uydu ve alıcı saat hatalarından, geometriden (yörünge ve istasyon koordinatlarından) bağımsızdır. Bu çözüm yalnızca iyonosferik gecikme ve faz başlangıç belirsizliğini içerir ve iyonosfer modellerinin kestiriminde kullanılır. L_5

doğrusal kombinasyon çözümü faz sinyal kesikliklerinin onarımında ve tamsayı belirsizliklerinin çözümünde kullanılır. L_6 sinyali hem taşıyıcı fazların hem de kod gözlemlerinin bir kombinasyonudur. Bu kombinasyon ile iyonosfer etkisi, geometri, saat hataları ve troposfer etkileri elimine edilir.

GPS sisteminin modernizasyonu amacıyla sinyallerin güçlendirilmesi ve sisteme yeni sinyallerin eklenmesi söz konusudur. Bu kapsamda C/A kodu L_2 sinyali üzerine modüle edilerek iyonosferik etkinin daha iyi modellendiği, multipathe daha az duyarlı ve sinyal gürültü oranını güçlendiren L_2C sinyali Blok II-R ve Blok IIF uydularından yayınlanmaya başlamıştır. L_5 sinyalinin tam olarak çalışmaya başlamasıyla iyonosferik etki konusunda önemli yararlar sağlaması beklenmektedir. L_5 , L_2C 'den yaklaşık 4 kat daha güçlüdür ve bu olumsuz arazi koşullarında yapılan çalışmalarda daha iyi sonuçlar alınmasını sağlar [1].

Çizelge 3. 2 L_1 , L_2 ve doğrusal kombinasyonları [17]

DK	Tanımlama	Dalga boyu (cm)
L_3	İyonosferden bağımsız doğrusal kombinasyon	0
L_4	Geometriden bağımsız doğrusal kombinasyon	∞
L_5	Wide-lane doğrusal kombinasyon	86
L_6	Melbourne-Wübbena doğrusal kombinasyon	86

3.1.2 GLONASS ve GALILEO Sinyal Yapısı

GPS dışında GLONASS ve Galileo sistemlerinin uydu sinyal yapılarının bilinmesinde fayda vardır. GLONASS uyduları iki tür sinyal kullanırlar. Birincisi 316-500 watt arasında iletilen sağ el dairesel polarizasyona sahip standart hassasiyetli sinyaldir (SPS). Her uydu standart hassasiyetli sinyali aynı kod üzerinde fakat farklı frekanslar kullanarak iletir. 1602,0 MHz merkez frekansı çevresinde farklı frekansları ayırmak için kullanılan frekans bölüşümlü çoklu erişim (FDMA) olarak adlandırılan teknikle beraber, L_1 bandı kullanılır. 15 kanalın frekansları $1602,0 \text{ MHz} + 0,5625 \text{ MHz} \times n$ formülü ile belirlenir. Burada n -7'den + 7'ye tamsayı değerleridir. 0 kanalı için frekans değeri 1602,0 olurken , -7 kanalı için frekans değeri 1595,56 MHz değerine sahip olur. Yüksek hassasiyetli sinyal olarak (HPS) bilinen ikinci sinyal SPS ile aynı taşıyıcı dalgayı paylaşır ancak on kat daha büyük bant genişliğine sahiptir. 15 L_2 frekansını

ayırmak için yine FDMA tekniği kullanılır. Merkez frekansı 1246,0 MHz' dir. L1 için kullanılan aynı n tamsayı değerleri L2 içinde geçerlidir ancak $1246 \text{ MHz} + 0,4375 \text{ MHz} \times n$ formülü kullanılır [18].

Galileo uydu dizilimindeki her uydu, frekansları 1164 – 1592 MHz aralığında değişen sağ el dairesel polarizasyona sahip sinyallerin iletiminde GPS sisteminde olduğu gibi kod bölüşümlü çoklu erişim (CDMA) teknolojisini kullanır. Her sinyale özel bir kod ya da anahtar eklenerek alıcıların sinyalleri tanımlaması ve sinyal iletim süresinin belirlenmesi sağlanır. Kod ne kadar karmaşıksa alıcının hangi sinyalin hangi uyduya ait olduğunu belirlemesi de o kadar uzun sürer. Bu uydu kodları iki formatta gelir. Uzun kodun yakalanması daha zordur fakat zayıf sinyallerin izlenmesini kolaylaştırır. Kısa kodlar ise sinyallerin çok hızlı yakalanmasına olanak sağlar [18]. E5a bandı 1164-1189 MHz aralığındadır ve 1176,45 MHz merkez frekansına sahiptir. Bu aynı zamanda GPS L5 sinyali için kullanılan bant aralığıdır. E5b bandı GLONASS L3 bandının da kullandığı 1189-1214 MHz bant genişliğine sahiptir ve ana frekansı 1207.14 MHz' dir. Çok loblu E6 bandı 1260-1300 MHz bant aralığını kullanır ve Galileo' ya özgüdür. E2, L1 ve E1 sinyalleri 1559-1592 MHz bant aralığını kullanır. 1575,42 MHz merkez frekansına sahiptir ve hem GPS hem de Galileo L1 sinyalleri tarafından kullanılırlar.

Çizelge 3. 3 GNSS uydu sinyal bileşenleri [2]

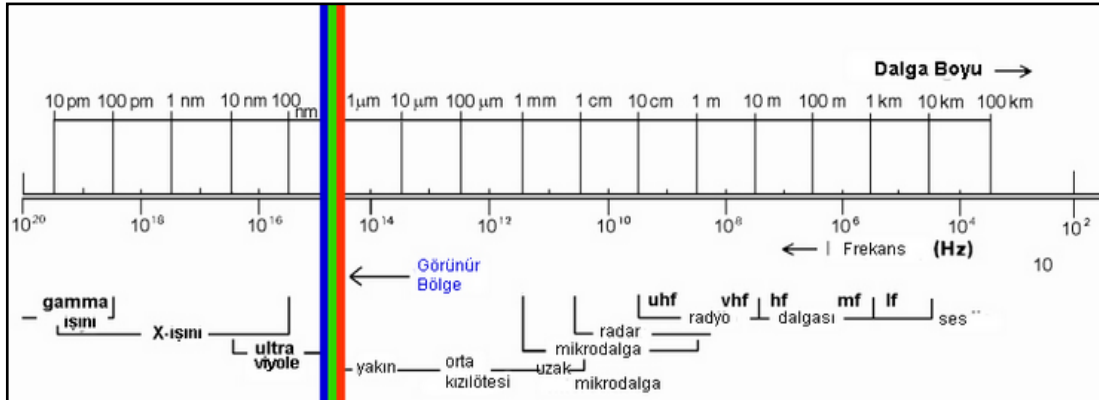
Bant	Bant genişliği (MHz)	Dağılım
L5 bandı	1164-1188	L5 (GPS)
	1188-1214	E5 (Galileo)
L2 bandı	1215-1239	L2 (GPS)
	1237-1260	G2 (GLONASS)
	1254-1258	E4 (Galileo), dar bant
	1260-1300	E6 (Galileo)
L1 bandı	1559-1563	E2 (Galileo), dar bant
	1563-1587	L1 (GPS)
	1587-1591	E1 (Galileo), dar bant
	1593-1610	G1 (GLONASS)

3.2 GNSS Anten Yapısı

3.2.1 Elektromanyetik Işıma ve Radyo İletişimi

Elektromanyetik ışıma radyo dalgalarını, mikro dalgaları, kızıl ötesi ışınları, görünür ışık bölgesini, mor ötesi dalgaları, X ışınlarını ve gama ışınlarını içermektedir. Bunların hepsi elektromanyetik spektrumu oluşturur ve hepsi ışık hızında hareket eder. Tek farkları dalgaların taşıdığı enerji ile doğrudan ilişkili olan dalga boylarıdır. Dalga boyu ne kadar kısaysa enerji o kadar fazla olur.

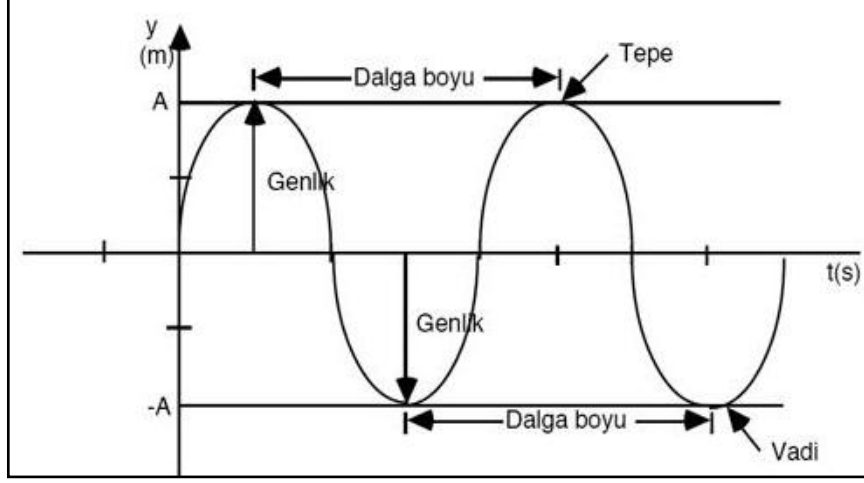
Dalga boşlukta ve madde içinde yayılabilen ritmik bir olaydır. Bir iple yaratılan dalga, bir tepe ve bir vadiye sahiptir. Tepeye karın, vadiye ise çukur adı verilir. Her dalga belli bir dalga boyuna sahiptir. Bir karından bir karına olan toplam mesafeye bir dalga boyu adı verilir. Aynı şekilde bir çukurdan, diğerine olan mesafede aynıdır. Genlik, bir dalganın normal konumundan yükselme ve alçalma mesafesidir. Uzanımın en büyük ve en küçük olduğu konumlar diye de tarif edilebilir. Genlik, dalgayı ortaya çıkaran enerjinin miktarına bağlıdır. Dalganın enerjisi artarken, genlik de artar.



Şekil 3. 2 Elektromanyetik spektrum

Tüm dalgalar belli bir frekansa sahiptir. Frekans, bir saniyede belli bir noktadan geçen dalgaların sayısıdır. Belirli bir noktayı bir saniyede geçen dalga sayısı arttıkça, frekans da artar. Dalganın uzunluğu arttıkça, dalganın belirli bir noktadan geçiş süresi artar, dalga kısaldıkça, geçiş süresi azalır. Maddenin ileri geri hareketine titreşim hareketi denir. Bir titreşimin frekansı, hertz adı verilen bir birimle ölçülür. Bir hertz (Hz), bir dalganın her saniyede bir devir veya bir titreşim yapmasıdır. Bir dalganın frekansı ve dalga boyu arasında ters yönlü bir ilişki vardır. Başka bir ifadeyle bir dalganın boyu artarsa, frekansı azalır. Buna göre uzun dalgalar düşük bir frekansa, kısa dalgalar ise yüksek bir frekansa sahiptir. Bir dalganın hızı, dalganın frekansı ve dalga boyuna

bağlıdır. Frekans hertz (Hz) biriminde ölçülür ve ifade edilir. Pratik olarak bir radyo dalganın hızının, dalganın genliği ya da frekansı gözetilmeksizin sabit olduğu göz önüne alınır. Frekans ışık hızının dalga boyuna bölünmesi ile elde edilir.



Şekil 3. 3 Dalga modeli [19]

Radyo iletişimi yedi bileşenden oluşur: iletici, güç kaynağı, iletim hattı, iletim hattı, yayılma yolu, alıcı anteni ve alıcı. İletici bir radyo sinyali oluşturur. Güç kaynağı çalışma gerilimi için gerekli gücü sağlar. İletim hattı sinyali ile ileticiden iletim antenine gönderir. İletim anteni de sinyali alıcına anteni doğrultusunda boşluğa (uzaya) gönderir. Boşluktaki sinyalin alıcı antenine kadar izlediği yola yayılma yolu adı verilir. Sinyal alıcı anteni tarafından alınır ve yine iletim hatları aracılığıyla alıcıya gönderilir. Alıcı tarafından bu sinyal işlenir. Amaç alıcı istasyonunda mümkün olan en güçlü sinyali sağlamaktır. En iyi sinyal alıcı anteninde en iyi sinyal gürültü oranını sağlayan sinyaldir. Radyo iletişim çevrimini gerçekleştirmek için;

- Çeşitli bilgilerle modüle edilmiş elektromanyetik dalganın oluşturulması ve ışınlması
- Dalganın iletim anteninden alıcı antenine etkin biçimde yayılmasını sağlamak
- Alıcı anteni kullanılarak dalganın alınması
- Alınan enerjinin çözülerek iletilen bilginin kullanılacak biçime getirilmesi gereklidir.

3.2.2 GNSS Antenlerinin Özellikleri ve Performans Gereksinimleri

GNSS alıcılarının sinyalleri kullanabilmesi için öncelikle bu sinyallerin alıcı antenleri tarafından yakalanması gerekmektedir. GNSS antenlerinin görevi uydulardan alınan elektromanyetik dalgaları alıcıda işlenecek elektrik akımına dönüştürmektir. GNSS sinyalleri radyo istasyonları ve yersel telekomünikasyon servisi sinyallerine göre daha zayıf sinyallerdir ve GNSS antenleri bu sinyalleri en etkili biçimde yakalamak ve izlemek, aynı zamanda da mümkün mertebe gürültü etkilerini engelleyecek şekilde tasarlanmıştır. Antenin şekli ve GNSS sinyallerinin alınması ve alıcıya iletilmesi konusunda antenin performansını etkilemektedir.

Bir elektromanyetik dalga yüklü parçacığın ivmelenmesi ile oluşan elektrik ve manyetik alan bileşenleri ile kendiliğinden yayılım gösteren dalgadır. Ses dalgalarının aksine elektromanyetik dalgaların iletimleri için ortama ihtiyaçları yoktur. Bir alıcı anteni elektromanyetik dalgayı yakaladığında, bu dalgaya ilişkin alanlar antenin içinde bir iletim hattı boyunca alıcıya beslenecek olan akımı indüklerler.

Birçok pratik durumda alıcı anteni, aynı antenin iletim anteni olarak kullanılması durumunda sahip olduğu özelliklere sahiptir ve bu karşılıklılık antenlerin çalışma prensiplerini açıklarken büyük kolaylık sağlar [20].

GNSS antenlerinin işlevselliğini etkileyen faktörler ve performans gereksinimleri söz konusudur. Antenlerin göz önünde bulundurulması gereken fonksiyonlarından ve özelliklerinden bazıları aşağıda sıralanmıştır:

- Antenlerinin polarizasyonu
- Kazanç modeli
- Frekans kapsamı / Bant genişliği
- Işıma modeli
- Rezonant frekansı
- Voltaj durağan dalga oranı (VSWR)
- Eksenel oran
- Empedans
- Ground plane kullanımı

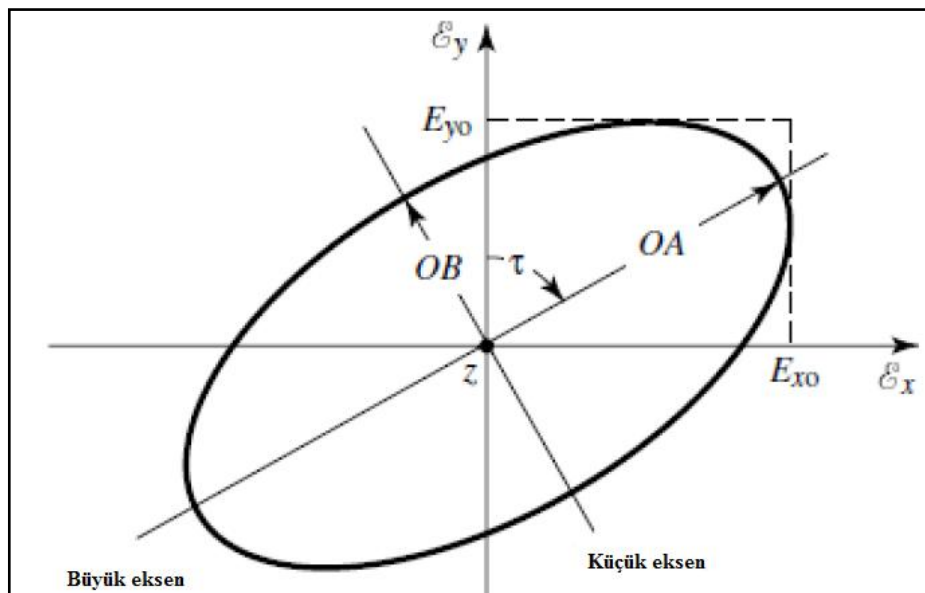
- Düşük gürültü ön yükseltici (low noise preamplifier)
- Diğer faktörler

3.2.2.1 Antenlerin Polarizasyonu

Bir elektromanyetik dalganın polarizasyonu, dalga uzayda hareket ederken sabit bir noktada zamanın fonksiyonu olarak elektrik alan dönüşünü tanımlayan niteliğe verilen isimdir. Elektrik ve manyetik alan vektörleri her zaman Maxwell eşitlikleri ile ilişkili olduğundan bunlardan birinin polarizasyonunu belirtmek yeterlidir ve genellikle elektrik alan ile belirtilir. Elektrik alan vektörünün ucu tarafından çizilen şekil polarizasyonu belirtir [21].

Serbest boşlukta (vakum) ya da herhangi bir homojen, isotropik (eş yönlü), doğrusal ve kararlı bir ortamda elektrik ve manyetik alanlar birbirine karşılıklı olarak diktir ve bir düzlem oluştururlar. Elektromanyetik dalga bu düzleme dik olarak yayılır [5]. Eğer pozitif z eksen dalganın yayılım yönünde olan bir koordinat sistemi tanıtırsak elektrik ve manyetik alan vektörleri x-y düzleminde bulunmaktadır.

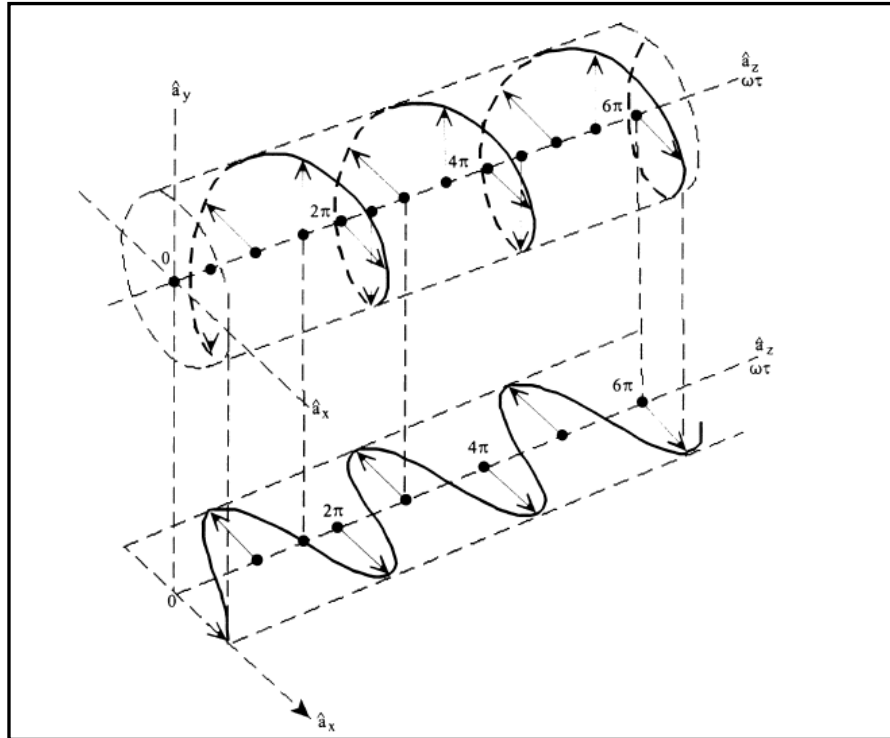
Elektrik alan vektörünün ucunun çizdiği şeklin biçimi polarizasyon elipsi olarak da adlandırılır. Şekil 3.4'te verilen elips polarizasyon hakkındaki her şeyi belirtir. Eksenel oran polarizasyon elipsinin şeklini belirtir. Eğim açısı polarizasyonun yönelimini belirtir. Elektrik alan vektörünün doğrultusu sinyal yayılma doğrultusundaki polarizasyon yönüdür.



Şekil 3. 4 Düzlem dalga ve polarizasyon elipsi [22]

Doğrusal, eliptik ve dairesel olmak üzere üç şekil polarizasyon vardır. Elektrik alan bir pozitif x eksenine diğeri pozitif y eksenine paralel olan iki ortogonal vektör şeklinde bileşenlerine ayrılabilir. Eğer x ve y bileşenleri aynı faza sahip ya da farkları π 'nin tamsayı katları şeklindeyse elektrik alan vektörü her zaman sabit bir doğrultuyu göstereceğinden dalga doğrusal polarizasyona sahiptir. Eğer bu iki bileşen faz farkı gösteriyorsa, ikisinin toplamı z ekseninde yakınlarında bir elips tanımlar. Bu tür dalga eliptik ucaylanmış (polarize-kutuplanmış) dalga olarak tanımlanır. Eğer bu iki bileşen aynı büyüklüğe sahip fakat $\pi/2$ ya da $\pi/2$ 'nin tek katları şeklinde faz farkı gösteriyorsa elips daire şeklini alır ve böylesi dalgalara dairesel ucaylanmış (polarize) dalga adı verilir.

Dairesel polarizasyon "ellilik" gerektirir. Bu şu anlama gelmektedir: Eğer dalganın yayıldığı doğrultu üzerinde bulunan noktadan bakan bir gözlemci için elektrik ve manyetik alan vektörleri saat yönünde dönüyorsa polarizasyon sağ ellidir denir. Aksi durumda dalga sol el dairesel polarizasyona sahiptir.



Şekil 3. 5 Sağ el dairesel polarizasyona sahip elektromanyetik dalga [22]

Sinyal ile aynı polarizasyon özelliklerine sahip anten kullanılmasının avantajlarından biri alıcı anten tarafından sinyalin daha kolay belirlenmesidir. Ayrıca bu sinyal anten tarafından uzaydaki diğer sinyallerden de daha kolay biçimde ayırt edilebilir. Bu şekilde sinyal alma gücü daha fazla olacağından alınan sinyal daha temiz olacak ve daha az hata üretecektir [23].

3.2.2.2 Antenlerin Eksenel Oranı

Eksenel oran (Axial ratio) polarizasyon elipsinin büyük ekseninin küçük eksenine oranı olarak tanımlanır [24]. GNSS sinyallerine karşı maksimum hassasiyete sahip olmak için ideal bir GNSS anteni mükemmel bir sağ el dairesel polarizasyona sahip olmalıdır. Bununla beraber gerçek bir anten eliptik olarak polarize olur ve antenin polarizasyonu ne kadar eliptik olursa RHCP hassasiyeti ve anten kazancı o kadar düşük olur. Doğrusal polarizasyon için AR sonsuz olarak tanımlanırken çok iyi sağ el ya da sol el bir dairesel polarizasyon için 1 (0 dB) olarak tanımlanır. Eksenel oran formülü eşitlik (3.2)'de verilmiştir [25]. Bir antenin eksenel oranı genellikle merkez frekansı olan belirli bir frekansta belirlenir. Birçok GNSS anteni yönlendirme açısı büyüdükçe artan bir eksenel orana sahiptir. GNSS uygulamalarında anten yarıküresinin üst kısımlarındaki yükseklik açıları için AR değeri düşük tutulmalıdır. İyi GNSS antenleri zenit doğrultusunda 2 desibel (dB) ya da daha bir iyi eksenel orana sahiptir [5]. GNSS antenlerinin görüş açısı (boresight) eksenel oranı genellikle 3 dB değerinin altında olmalıdır [24].

$$AR = \frac{E_{\text{major}}}{E_{\text{minor}}} = \frac{|E_{\text{RHCP}} + E_{\text{LHCP}}|}{|E_{\text{RHCP}} - E_{\text{LHCP}}|} \quad (3.2)$$

$$E_{\text{RHCP}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{\theta} + jE_{\phi}) \quad (3.3)$$

$$E_{\text{LHCP}} = \frac{1}{\sqrt{2}}(E_{\theta} - jE_{\phi}) \quad (3.4)$$

E_{θ} ve E_{ϕ} küresel koordinat sisteminde tanımlı ϕ ve θ yönlerindeki doğrusal bileşenlerdir.

3.2.2.3 Antenlerin Kazanç Modeli

Anten performans ölçütlerinden bir olan anten kazancı kusursuz biçimde tüm yönlü bir antene nazaran belli bir doğrultuda antenin ne kadar enerji ışıdığını belirten bir orandır ve dB ile ifade edilir. Yayılan gücün, yayılan güç kayıplarından dolayı harcanan gücün toplamına oranı anten verimi olarak adlandırılır. Bir antenin; referans anten olan isotropik antenin her yöne yaydığı güce eşit gücü, belli bir doğrultuya yayabilme özelliğine o antenin yönlülüğü (directivity) adı verilir. Diğer bir deyişle anten yönlülüğü maksimum ışıma (yayılma) yoğunluğunun ortalama ışıma yoğunluğuna oranıdır. İsootropik dışındaki tüm kaynakların yönlülüğü her zaman birden büyüktür [26]. Yönlü bir antenden belirli bir yönde yayılan güç yoğunluğunun, aynı noktaya referans anten olan isotropik anten tarafından yayılan güce oranına yönlendirme kazancı denir. Yönlendirme kazancı ile anten veriminin çarpımı güç kazancını ifade eder. Anten kazancı antenin tasarımına bağlıdır. Antenin belirli bir aralığın üzerindeki uydu yükseklik ve azimut açıları için hassasiyetini ifade eden kazanç modeli multipath sinyallerinin ayrıştırılmasına yardımcı olur [20].

3.2.2.4 Antenlerin Empedansı

Bir anten içinden geçen akıma karşı dirence sahiptir. Aynı zamanda alternatif akım akışını etkileyen elektriksel kapasite ya da endüktans nedeniyle anten bir miktar reaktansa da sahip olabilir. Akımın maruz kaldığı karşıtlıkların tamamına empedans adı verilir ve karmaşık sayılarla ifade edilirse gerçek kısım direnci, sanal kısım reaktansı gösterir. Anten veya herhangi bir devre elemanı içindeki akım ile empedans ve voltaj arasındaki ilişki Ohm kanunlarının alternatif akıma uyarlanması ile açıklanabilir. Empedans voltajın akıma oranıdır ve ohm birimindedir.

Antenlerin empedans değerleri genellikle antenlerin iletim hatlarına bağlı olduğu besleme noktalarında ölçülür. Bir antenin empedans değeri çeşitli faktörlere bağlıdır. Antenin nasıl üretildiği, nasıl beslendiği ve antenin bulunduğu çevre empedansı etkileyen faktörlerden bazılarıdır. GNSS antenlerinin çoğu 50 ohm karakteristik empedans değerine sahiptir.

Eğer anten bir kutu içine yerleştirilirse antenin empedansı ve rezonant frekansı değişebilir. Örneğin plastik bir kutu içine yerleştirilen microstrip patch anteninin rezonant frekansı plastiğin kalınlığı ve dielektrik katsayısına bağlı olarak çok miktarda

azalma göstermiştir (megahertz biriminde). Bu sebeple anten üreticileri patch antenleri gerçek çalışma değerinden çok daha yüksek bir değerde rezonans üretecek şekilde tasarlarlar.

3.2.2.5 Antenlerin Rezonans Frekansı

Anten rezonans frekansı diğer bir deyişle çalışma frekansı genellikle ilgili banttaki merkez frekansıdır. Gerçekte ise rezonant frekansı radom gibi anten paketlerinden dolayı örneğin GPS L1 merkez frekansında 5 MHz değerinde kayma gösterecektir [24]. Bu nedenle element tasarımı 5 MHz daha yüksek tasarlanır ki radom yerleştirildiği zaman frekans düzgün çalışma frekansına doğru kayıklık gösterecektir. Bunlara ilaveten frekans kayıklığı mikro şeritli antenler için farklı ground plane ebatlarından da kaynaklanabilir [24]. Bu nedenlerden dolayı antenin çalışma frekansına karar verilirken frekans kayıklığı göz önünde bulundurulmalıdır.

3.2.2.6 Voltaj Durağan Dalga Oranı (VSWR)

Bir rezonans anteni içindeki akım ve voltaj dağılımı bir durağan ya da kararlı (sabit) dalgadır. Bir durağan dalga aynı frekansa sahip zıt yönde hareket eden dalgaların bindirilmesi ile oluşturulur. Örneğin ideal bir yarım dalga dipol içinde besleme noktalarından geçen akım telin iki ucunda yansımaya uğramaktadır. Yansıyan dalga gelen dalgayla birleştirildiğinde her iki ucunda sabit sıfır ve merkezinde maksimum genliğe sahip bir sinüzoidal durağan dalga oluşur. Önemli hususlardan biri de anten-alıcı bağlantısıdır. Bu bağlantı genellikle eşeksenli bir kabloyla gerçekleştirilir. Antenden alıcıya iletilen sinyali maksimize etmek için güç kaybı minimize edilmelidir. Güç kaybı anten ile alıcı arasındaki bağlantının mükemmel olmaması hatta kablonun kendisinden de kaynaklanabilir. Anten ile kablo arasındaki ara birimdeki güç kaybını önlemek için kablo ve anten aynı empedans değerine sahip olmalıdır.

Antenler önceden belirlenmiş empedans değerleri ile eşeksenli kablolarla bağlanacak şekilde tasarlanmıştır. Eğer antenin karakteristik empedansı kabloununkinden farklı ise bir tür alıştırma devresi antenin içine katılmalıdır. Böylece kablo ve anten empedansları anten bağlantı uçlarında eşleşir. Daha önceden bahsedildiği gibi GPS antenleri 50 ohm değerinde empedansa sahiptir. GPS antenleri 50 ohmluk kablolarla çalışacak şekilde tasarlanmıştır. Eğer antenle alıştırma devresi ya da devreyle kablo arasında herhangi bir

uyumsuzluk mevcutsa kablo içinde durağan dalgalara sebebiyet veren sinyal yansımaları görülebilir.

Empedans uyumsuzluğunun miktarı kablo boyunca tepe sinyal voltajının ölçülmesiyle belirlenebilir. Maksimum tepe voltajının minimum tepe voltajına oranı voltaj durağan dalga oranı (VSWR=Voltage standing wave ratio) olarak adlandırılır. Yansımaların olmadığı durumda VSWR 1:1 değerine sahiptir. Böylesi bir VSWR değerini elde etmek pratikte mümkün değildir ve birçok anten için öngörülen 1,5:1 değeri oldukça iyidir. Böylesi bir antende meydana gelecek sinyal kaybı sadece 0,18 dB'dir.

3.2.2.7 Işıma Modeli

Genel olarak GNSS antenleri anten yarıküresinin üst kısmındaki tüm görünür uydulardan sinyal alacak biçimde iyi uydu kapsama alanına sahip ve aynı zamanda ufuk çizgisi civarında multipath etkisini engellemek için keskin azalma gösteren ışıma modeli şekline sahip olmalıdır. Anten yarıküresinin üst kısmında iyi uydu kapsamına sahip olması GNSS anteninin, uyduların zenitten uydu yükseklik açısına kadar görünür olduğu bölgede, faz ve büyüklük olarak sabit bir kazançla sahip olması anlamına gelmektedir. Uydu yükseklik açısının altında troposfer ve multipath nedeniyle farklı yönlerden gelen uydu sinyalleri herhangi bir kazanç oluşturmazlar [24]. Anten kazancı uydu izlemede iyi bir sinyal gürültü oranına sahip olmak amacıyla GNSS alıcısının minimum sinyal gücü gereksinimlerini karşılamak için uydulardan alınan sinyalin muhafaza edilmesi için yeterli olmalıdır. Uzak alan bölgesinde antenin açısız alan dağılımı anten alanında bulunan belirli bir noktadan olan uzaklıktan bağımsızdır. Işıma modeli antenin uzak alan bölgesinde ölçülür [26].

3.2.2.8 Frekans Kapsamı / Bant Genişliği

Bir diğer önemli anten karakteristiklerinden biri de bant genişliğidir. Bant genişliği giriş empedansı, polarizasyonu, modeli ve bunun gibi parametrelerin ölçülmesi ile belirlenen anten performansının kabul edilebilir şekilde iyi olduğu frekans bandıdır. Bant genişliğinin yeteri kadar geniş olması istenir. Antenler dar bantlı ya da geniş bantlı olabilir. Rezonant antenler karakteristik olarak dar bantlıdır ancak bant genişlikleri arttırılabilir. Eğer anten sadece dar frekans bandında çalışan sistemler için kullanılırsa bu durumda antenin bant genişliğinin dar tutulması potansiyel olarak birbirine karışan

birbirine çok yakın frekanslardaki sinyallerin azaltılması için bir avantajdır. Tek frekanslı GPS antenlerinin büyük çoğunluğu dar bantlı cihazlardır.

Günümüzde kullanılan GNSS alıcıları ilk GPS bantlarına ilave olarak GPS L5, Galileo E5/E6 ve GLONASS bantlarını içerebilir. Aşağıdaki tabloda GNSS uyduları tarafından kullanılan frekansların genel görünümü sunulmuştur.

Çizelge 3. 4 GNSS uydu frekansları [6]

	Frekanslar (MHz)				
Sistem	L1	L2	L3	L5/E5	E6
GPS	1563-1588	1215-1240	N/A	1164-1189	N/A
GLONASS	1592-1615	1237-1257	1194-1209	N/A	N/A
Galileo	1554-1596	N/A	N/A	1145-1238	1258-1300

Antenlerin bant genişliği ihtiyacı arttıkça antenlerin tasarımı gittikçe zorlaşmaktadır ve tüm bu bantları kapsayan bir anteni üretmek, bu anteni tüm diğer gereksinimlerle uyumlu hale getirmek zorlu bir görevdir.

3.2.2.9 Düşük Gürültü Ön Yükseltici (Low Noise Preamplifier)

Antenleri olası darbelerden korumak için genellikle sinyalleri minimum derecede zayıflatacak plastik radomlar kullanılır. Bilindiği gibi GNSS sinyalleri zayıf sinyallerdir. GNSS alıcılarının geniş antenlere ihtiyaç duymaması GPS'in sinyal yapısı ve GNSS alıcıları ile ilişkilidir. Bununla beraber GNSS antenleri ile düşük gürültü ön yükseltici kombinasyonunun sağlanması ile sinyalin seviyesi artırılır. Antenlerin ayrı birim olduğu sistemlerde ön yükseltici antenin altında bulunur ve gücünü sinyali alıcıya taşıyan aynı eşmerkezli kablolardan alır. Böylesi antenlere aktif anten adı verilir. GNSS anteni ön yükselticisi tarafından ihtiyaç duyulan kazanç antenin kendi kazancı, çalışma kablosu uzunluğu, alıcı ara yüzünün gereksinimleri gibi birçok faktöre bağlıdır. 20, 26, 40 ve hatta 50 dB değerinde kazançlara sahip aktif antenler mevcuttur.

Ön yükselticinin (preamplifier), gürültü değerinin GNSS alıcılarının tüm sinyal gürültü performansı üzerinde baskın bir etkisi olduğundan, hem düşük gürültü değerine hem de yüksek kazançla sahip olması istenir. Alıcılardaki alt katmanlar ön yükselteç gürültüsünü

güçlendirir. Genel gürültü değerleri 1,2 ile 2,5 dB arasındadır. GNSS anteninin dar bantlı tasarımı, alıcıları ve ön yükselticileri cep telefonu sinyalleri gibi karıştırıcı sinyallerden korumasına rağmen sisteme ön yükselticiden önce ve sonra uygulanan filtrelerle ilave yardımlar edilebilir.

Ön yükselticiden sonra yerleştirilen filtre anten tümleşkesinin düşük gürültü karakteristiğini korumaya yardımcı olur. Ön yükleyiciden önce yerleştirilen filtre anten tümleşkesinin gürültü değerini arttırabilirken ön yükselticiyi, aşırı yüklemeye girişimlerine karşı güçlendirilecek frekans bandını önceden seçerek, korumaya yardımcı olur.

GNSS alıcıları, alıcı üreticisi tarafından temin edilmeyen aktif bir antenle kullanılmak istenirse dikkat edilmesi gereken hususlar vardır. Antenin hem gürültü değeri ve kazancı kabul edilebilir aralıklar içinde olmalı hem de antenin ön yükselticisine alıcı tarafından sağlanan voltaj ve akım antenin gereksinimleri ile uyumlu olmalıdır. Ters bağlantı ya da aşırı gerilim durumlarında ön yükselticinin zarar görmesini önlemek için antenler diyot koruyucu içermelidir.

3.2.2.10 Anten Yer Düzlemi (Ground Plane)

Bazı antenler düzgün çalışabilmek için yer düzlemine ihtiyaç duyarlar. Bu genellikle üzerinde asıl anten elemanlarının bulunduğu düz veya şekilli bir metal parçasıdır. Belirli bir büyüklüğe kadar yer düzlemi ne kadar genişse antenin zenit kazancı o kadar yüksek olur. Jeodezik ölçmelerde bir metal plaka ya da plakalar ile ground plane (yer düzlem) genişletilerek antenin multipath etkisine karşı performansı arttırılır.

Bunların dışında GNSS anteninin performansını etkileyen birçok faktör vardır ve uygulamanın ihtiyaçlarına göre göz önünde bulundurulmaları gerekebilir. Sıcaklık etkisi, nem (bağıl nem), tuz, salınım ve mekanik şok etkileri bunlardan bazılarıdır. Faz merkezi değişimi bir sonraki bölümde detaylı biçimde anlatılmıştır. Ayrıca bir antenin multipath duyarlılığı multipath oranı (MPR) ile antenin kazanç modeli karakteristiğine göre belirlenebilir. Antenlerin sinyal karışımlarına ve alıcılar üzerine hassasiyetleri, yine sinyal grup gecikme özellikleri, iletim kablolarının özellikleri de göz önünde bulundurulmalıdır. Örneğin anten ve alıcı birbirine düzgün bağlanmamışsa güç kaybı ortaya çıkar. Eşeksenli kablolardan oluşan iletim hatlarının mükemmel olmaması ya da anten ile alıcı arasındaki bağlantının düzgün olmaması güç kaybına neden olur [20].

3.2.3 GNSS Anten Seçim Ölçütleri

GNSS antenleri seçilirken aşağıdaki hususlar göz önünde bulundurulmalıdır [24]:

- Hava araçları, uzay araçları, yer referans istasyonları, taşıtlar ve cep telefonları gibi farklı uygulama türlerinde farklı performans seviyelerine ihtiyaç duyulur.
- Uygulamanın türüne ve performans gereksinimlerine bağlı olarak tek veya çok frekanslı antenler belirlenmelidir.
- Belli bir uygulama için antenin yerleştirileceği yüzey, kullanılacak antenin şeklini ve boyutunu sınırlayabilir.
- Antenlerin maliyeti önemlidir.
- Farklı uygulamalara bağlı olarak aktif ya da pasif antenler seçilebilir.

3.2.4 GNSS Anten Tipleri

Yüksek duyarlıklı GNSS uygulamaları jeodezik alıcı ve anten kullanımını gerektirir. Minimum olarak genel jeodezik antenler GPS L1 ve L2 bantlarını kapsar. Bazıları buna ek olarak GLONASS bantlarını da kapsar. Bazı yeni tasarımlarda L5 bandı ile beraber Galileo frekansı ve diğer GNSS servislerine ait L bantları da kapsanır. Jeodezik antenlerde genellikle choke ring ground plane kullanılır. Böylelikle iyi bir kazanç modeli kontrolü, multipathin giderilmesi, yüksek ön arka oranı ve düşük yükseklik açılarında iyi bir eksenel oran sağlanır. Choke ring sabit bir faz merkezine katkıda bulunur. En gelişmiş LNA ile jeodezik antenler mümkün olan en yüksek performansı sunar.

Gezici antenler genellikle arazi uygulamalarında, ormancılıkta, inşaat alanında ve diğer mobil uygulamalarda kullanılır. Azimuta karşı yatay faz merkezi değişimi düzeltmeleri hassas değildir. Bunun nedeni antenin manyetik kuzeye göre sahip olduğu yönelim hakkında bir bilgi yoktur ve alıcı da bunlara düzeltme getirilmez. Gezici anteni genellikle elde taşınır bir jalon üzerine monte edilir. Operatörden kaynaklanan çok yolluluğa ve zemin gürültüsüne karşı iyi bir ön arka oranına sahip olmalıdır.

Elde kullanılan alıcı antenleri tek frekanslı L1 bandında çalışan fiyat ve hacim bakımından en iyi şekilde kullanılan antenlerdir.

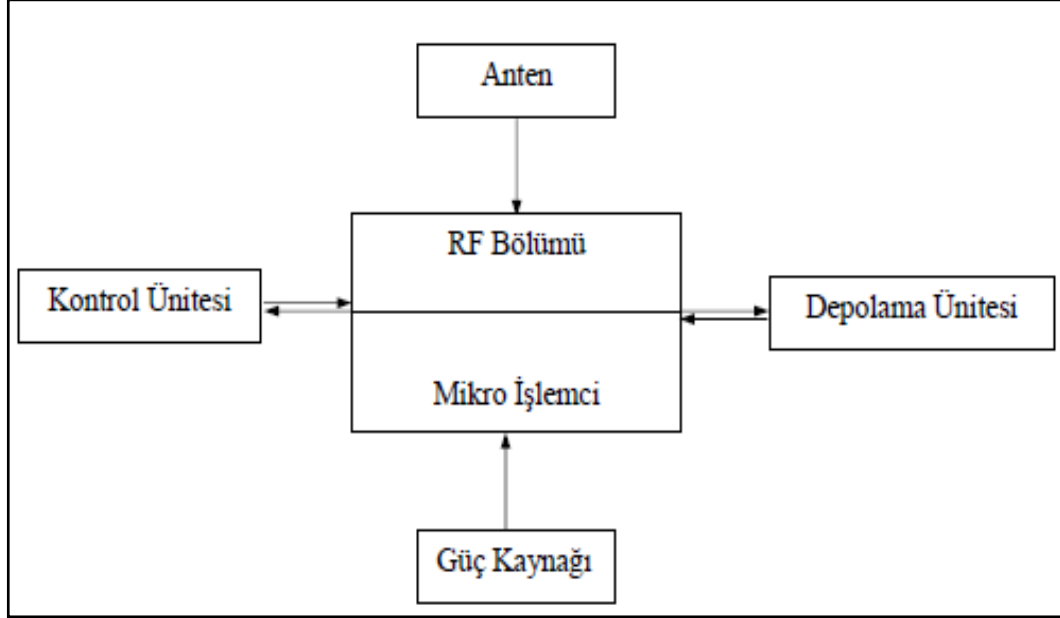
3.3 GNSS Alıcı Yapısı

GNSS alıcıları GPS, GLONASS, GALILEO, COMPASS gibi mevcut uydu sistemlerinin verileri ile SBAS (EGNOS, WAAS vb.) uydu sistemlerinin veri ve düzeltmelerini izleyip, kaydedip kullanabilen alıcılar olarak tanımlanabilir [1]. Günümüzde piyasada farklı amaçlar (navigasyon, ölçme, zaman transferi) için kullanılan farklı özelliklere sahip çok sayıda alıcı bulunmaktadır. Bu çeşitliliğe rağmen tüm alıcılar belli temel prensipleri benimsemektedir. Alıcı birimi sinyal alımı ve sinyal işleme işlemlerini yerine getirecek bileşenleri içermektedir ve bir GPS/GNSS alıcısını oluşturan temel bileşenler genel olarak bir anten ve/veya antenle birleşik önyükselteç, radyo frekans bölümü, komut girişi ve görüntü (kontrol) ünitesi, güç kaynağı, veri depolama ünitesi şeklindedir. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de basit alıcı yapıları gösterilmektedir.

Tüm yönlü antenler, anten ufkunun üzerindeki tüm uydu sinyallerini alır ve ön yükseltme işleminin ardından bu sinyalleri radyo frekans (RF) bölümüne iletir. PRN kodlarının her bir uydunun kendisine özgü olmaları ve çok küçük çapraz korelasyona sahip olmaları nedeniyle sinyaller herhangi bir karışmaya karşı dayanıklıdır. Antenler yalnızca L1 taşıyıcısı için tek frekanslı olarak ya da hem L1 hem de L2 taşıyıcıları için çift frekanslı olarak tasarlanabilir. Antenlerin en önemli tasarım kriteri faz merkezi hassasiyetidir. Antenin elektronik merkezi geometrik merkezine yakın olmalı, anten dönüklüğünden ve eğilmelerinden etkilenmemelidir. Bu durum özellikle antenin ölçüm süresince hareket halinde olduğu kinematik uygulamalarda önemlidir. Ayrıca antenin düşük yükseklik açılı sinyalleri ve multipath sinyallerini filtrelemesi için uygun kazanç modeline sahip olması gerekir. Günümüzde bu amaçlar doğrultusunda “choke ring” antenler tercih edilmektedir.

Mikro işlemci tüm sistemi kontrol etmekte, gerçek zamanlı navigasyon ve ölçme uygulamalarının gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Birçok farklı fonksiyonun yerine getirilme zorunluluğu GPS/GNSS alıcılarının çalışmasının mikro işlemcilerle kontrol edilmesini gerektirmektedir. Bu fonksiyonlar içerisinde alıcı açıldığında uydu sinyallerinin mümkün olduğunca çabuk yakalanması, navigasyon mesajının çözülmesi, kullanıcı koordinatlarının belirlenmesi gibi işlemler yer alır. Alıcının çalışma bilgilerini içeren mikro işlemci yazılımı bellek yongasının (çipinin) içine yerleştirilmiştir. Mikro işlemci taşıyıcı faz ve kod ölçülerinin dijital örneklemeleriyle çalışır. Bu veri örneklemeleri alıcıya sinyal akışı sırasında belli bir noktada gerçekleştirilen analogdan

dijitale dönüşüm işlemi sonucu elde edilir. Alıcı bu örnekleri kendi konumunu saptamada kullanır ve ilerideki değerlendirmelerde kullanmak üzere kaydeder. Mikro işlemciler aynı zamanda gürültü etkisini indirmek için ham verinin filtrelenmesi ve alıcının hareket halinde olduğu durumlarda daha güvenilir konum ve hız bilgilerini elde etmek gibi işlemleri de yerine getirir.



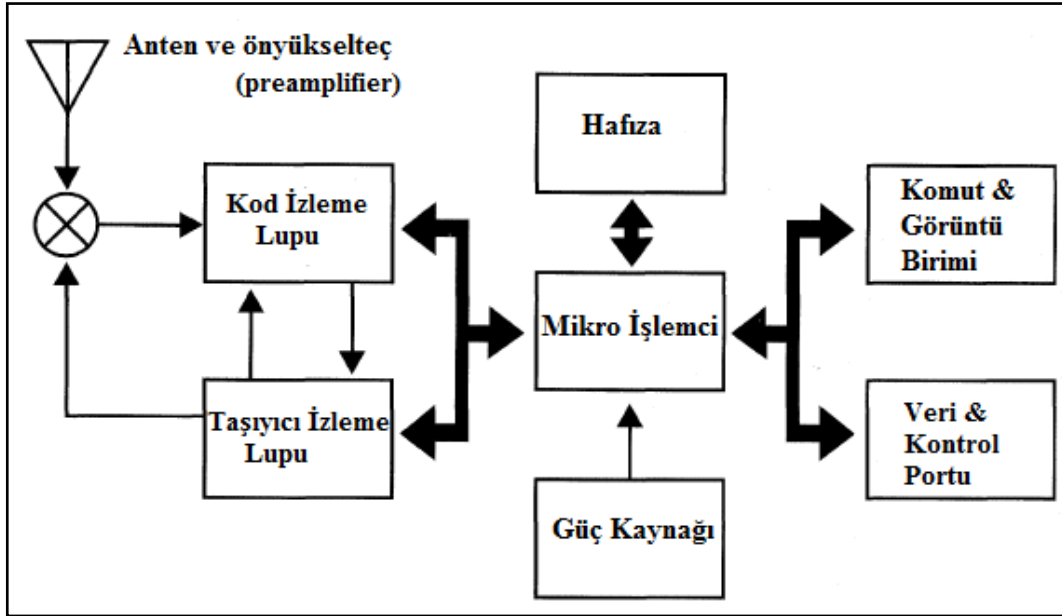
Şekil 3. 7 Basit bir alıcı yapısı [2]

Kontrol ünitesi alıcı ile interaktif iletişimi sağlar. Bu bölümde komutlar girilebilir, hata mesajları ve diğer mesajlar görüntülenebilir. Bu nedenle kontrol ünitesi genellikle klavye görüntü birimi olarak tasarlanır.

Büro değerlendirmelerinde kullanılmak üzere gözlemlerin ve navigasyon mesajının depolanması için bir depolama birimi gereklidir. PCMCIA kartları, mikro çipler ve diğer kalıcı bellekler kullanılmaktadır. Bunlara ilaveten alıcılar bilgisayara bağlanabilir.

Çoğu GNSS alıcısı dahili doğru akım (DC) güç kaynağına sahiptir. Bu güç kaynağı da genellikle şarj edilebilir nikel kadmiyum akülerdir. Yeni alıcılar olabildiğince az akım çekecek, ölçüm süresini olabildiğince uzun tutacak şekilde tasarlanır. Aynı zamanda GNSS alıcıları harici akü ve güç kaynaklarına bağlanabilir. RF (Radyo Frekans) bölümü alıcının en önemli kısmıdır. Antenden alıcıya gelen sinyalin ayırt edilme işlemi RF bölümünde gerçekleştirilir. RF bölümü ayrı kanallar kullanarak gelen sinyalleri değerlendirir. Eski alıcılar analog teknikler kullanırken günümüzde çoğu alıcı dijital sinyal işleme tekniğini kullanır. Tek frekanslı birimler yalnızca L1 sinyalini işlerken, çift frekanslı alıcılar hem L1 hem de L2 sinyallerini işlerler. Çift frekanslı alıcılarla

toplanan veri iyonosferik kırılmanın giderilmesini sağlayan doğrusal kombinasyona da olanak vermektedir. RF bölümü anten tarafından alınan sinyallerin frekanslarını ara frekansa (intermediate frequency -IF) dönüştürür. Bu dönüşüm işlemi gelen sinyal ile alıcıda bulunan osilatör tarafından üretilen sinüzoidal sinyalin birleştirilmesi ile sağlanır. Alıcılarda genellikle kuartz kristal osilatörler kullanılır. IF sinyali uydudan yollanan sinyalin sahip olduğu tüm modülasyonları içerir. Yalnızca frekansı kaydırılmıştır. Kaydırılmış dalganın frekansı, uydudan yollanan sinyalin frekansı ile osilatör tarafından üretilen sinyalin frekansının farkıdır.



Şekil 3. 8 Tek kanallı genel bir GPS alıcısının temel parçaları [27]

GNSS alıcı kod pseudo-uzaklık ve taşıyıcı faz ölçülerini gerçekleştirebilmek için uydudan yollanan sinyalleri birbirinde ayırmak zorundadır. Alıcılarda belirli sayıda kanal kullanarak bu ayırma işlemi gerçekleştirilir. Farklı uydulardan yollanan sinyaller PRN kodları yardımıyla kolaylıkla ayırt edilip farklı kanallara aktarılır.

Genel olarak kanal tekniklerine göre sürekli izlemeli (continuous tracking) ve sıralı izlemeli (sequencing - multiplexing) olmak üzere iki farklı tip GNSS alıcısı mevcuttur. Sürekli izlemeli GNSS alıcılarında her bir alıcı kanalı bir uyduya kilitlenir. Dolayısıyla üç koordinat bileşeninin ve bir alıcı saat hatasının belirlenebilmesi için en az dört kanala ihtiyaç duyulur. Ek kanallar daha fazla uydunun izlenmesine ve L2 sinyali ile çift frekans ölçü olanağından yararlanarak iyonosferik gecikme düzeltilmesinin getirilmesine imkan verir. Günümüzde jeodezik ve bilimsel amaçlı çalışmalarda 72 ve daha fazla kanallı alıcılar kullanılır.

Sıralı izlemeli GNSS alıcıları "multiplexing" ya da "sequencing" alıcılar olarak bilinir ve sürekli alıcıların aksine kanallar birer uydu sinyaline sürekli olarak tahsis edilmez. Bir kanal bir uyduya 20 milisaniye kilitlenir, daha sonra diğer uydulara da aynı süreyle kilitlenir ve veri toplar. Sonra tekrar ilk uyduya döner ve aynı işlemleri tekrar eder. Zaman paylaşımli bir tekniktir ve fazla kullanım alanı yoktur.

Çok kanallı alıcılar daha hassastır ancak kanallar arası hatalar meydana gelebilir. Bununla beraber modern alıcılarda bu hatalar hemen hemen elimine edilebilir. Sıralı izlemeli alıcılar daha ucuzdur fakat çok daha yavaştır ve ölçme çalışmalarında nadir olarak kullanılır.

Asıl pseudo-uzaklık ölçümleri izleme lup devrelerinde gerçekleştirilir. Uyduların hareket halinde olması nedeniyle alınan sinyaller Doppler kayıklığı içerir. Bu da izleme luplarının belirli bir frekans aralığı içinde ayarlanabilir olmalarını gerektirmektedir. Pseudo-uzaklık kod korelasyon teknikleri kullanılarak kod izleme lupunda belirlenir. Gelen sinyalden PRN kodu ayıklanarak ve çeşitli filtrelemeler gerçekleştirilerek modüle edilmemiş (Doppler kaydırmalı) taşıyıcı dalga elde edilir. Bu taşıyıcı dalga daha sonra sinyalin alıcıda üretilen kopyası ile karşılaştırıldığı taşıyıcı izleme lupuna geçer ve iki sinyal arasındaki frekans senkronizasyonu sağlanır. Her iki izleme lupu eş zamanlı ve iteratif olarak çalışırlar. Her iki lup alınan uydu sinyaline kilitlendiğinde alıcı-uydu mesafesi için navigasyon mesajı çözülür. GNSS alıcısı en az dört uydudan gelen sinyale kilitlenip, navigasyon mesajını çözümledikten sonra konum, hız ve zaman hesabı yapabilmektedir.

Uydu izleme teknikleri içinde en yaygın olanları kod korelasyon tekniği, kod fazı tekniği ve sinyal kare alma (squaring) tekniğidir. Bunlar dışında kod korelasyon ve kare alma tekniklerinin ikisinin beraber kullanıldığı ya da Z yarı kodsuz izlemeli alıcılar da mevcuttur. Veri toplama yöntemlerine göre alıcılar aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

- C/A kod ölçen alıcılar
- C/A kodlu taşıyıcı dalga fazı ölçen alıcılar
- P kod alıcıları
- Y kod alıcıları

Frekans sayılarına göre alıcılar aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir:

- Tek frekanslı alıcılar (L1)
- Çift frekanslı alıcılar (L2)
- Çok frekanslı alıcılar (L1/L1C, L2/L2C, L5, vb.)

GNSS GÖZLEMLERİ VE HATA KAYNAKLARI

GNSS gözlemleri ölçülen zamandan ya da alınan sinyal ile alıcıda üretilen sinyal arasındaki faz farkından elde edilen mesafelerdir. Yersel elektronik uzaklık ölçerlerin tersine GNSS biri uyduda diğeri alıcıda olmak üzere iki saat kullanılan tek yönlü bir sistemdir. Bu nedenle ölçülen mesafeler uydu ve alıcı saat hatalarını içerir ve bu nedenle “pseudorange” olarak ifade edilir.

4.1 Kod Ölçüleri

Pseudorange uydu ile alıcı antenleri arasındaki mesafenin ölçüsüdür. Bu mesafe uydudan yollanan GNSS sinyalinin alıcı antenine ulaşım süresinin ölçülmesi ile belirlenir. Sinyal iletim süresi, alıcı kodu ile GPS sinyalinin maksimum korelasyon analizi ile ölçülür. Alıcı kodu GNSS alıcısında kullanılan sinyalden elde edilir. GNSS sinyali de GNSS uydularında kullanılan saat tarafından oluşturulur. Her iki saatten kaynaklanan hatalar ve sinyalin iletildiği ortamın etkisi ile ölçülen pseudo-uzaklık ile uydu ve alıcı arasındaki geometrik uzaklık birbirinden farklıdır. Sinyal iletim yolu geometrik yoldan biraz farklıdır. İletim ortamı yalnızca sinyal gecikmesine neden olmakla kalmaz, aynı zamanda sinyalin eğri bir yol izlemesine neden olur.

$$R_r^s(t_r, T_s) = \rho_r^s(t_r, T_s) - (dt_r - dT_s)c + d_{ION} + d_{TROP} + d_{TIDE} + d_{MP} + d_{REL} + \varepsilon \quad (4.1)$$

Eşitlik (4.1)’de gösterildiği gibi ölçülen pseudo-uzaklık, uydu ile alıcı arasındaki geometrik uzaklığa çeşitli düzeltmeler getirilerek hesaplanır. Saat hataları ışık hızı ile ölçeklendirilmiştir. d_{ION} , d_{TROP} r istasyonundaki iyonosferik ve troposferik etkileri, d_{TIDE} karasal gelgit ve okyanus yükleme etkilerini, d_{MP} çok yolluluk etkilerini ve d_{REL} relativistik etkileri belirtir. Kalan hatalar (alıcı gürültüsü, rastgele hatalar) ε ile gösterilir.

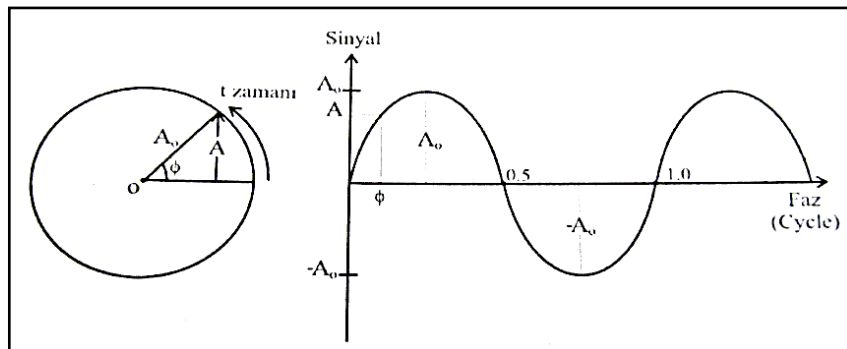
4.2 Taşıyıcı Faz Ölçüleri

Taşıyıcı faz alınan uydu sinyal fazının, sinyal alınma anında alıcı tarafından üretilen taşıyıcı faza göre bir ölçüsüdür. Ölçümler alıcıda üretilen fazın uydudan alınan fazi izleyecek şekilde kaydırılmasıyla gerçekleştirilir. İlk sinyal alınma anında uydu ile alıcı arasındaki tam dalga sayısı hesaplanamaz. Bu nedenle taşıyıcı faz ölçüsü fazın kesirli kısmını ölçmek ve tam dalgalarındaki değişimleri izlemek anlamına gelir. Faz ölçüleri kod ölçülerinden daha hassastır. Bir tam taşıyıcı dalgaya “cycle” adı verilir. Taşıyıcı faz ölçümünde belirsiz tam dalga sayısına “Ambiguity” ya da taşıyıcı dalga faz başlangıç belirsizliği adı verilir. Eşitlik (4.2) ve (4.3)’de taşıyıcı faz gözlemlerinin matematiksel modeli verilmektedir:

$$\Phi_r^s(t_r) = \rho_r^s(t_r, T_s) / \lambda - f (dt_r - dT_s) + N_r^s - d_{ION} / \lambda + d_{TROP} / \lambda + d_{TIDE} / \lambda + d_{MP} / \lambda + d_{REL} / \lambda + \varepsilon / \lambda \quad (4.2)$$

$$\lambda \Phi_r^s(t_r) = \rho_r^s(t_r, T_s) - (dt_r - dT_s) \cdot c + \lambda N_r^s - d_{ION} + d_{TROP} + d_{TIDE} + d_{MP} + d_{REL} + \varepsilon \quad (4.3)$$

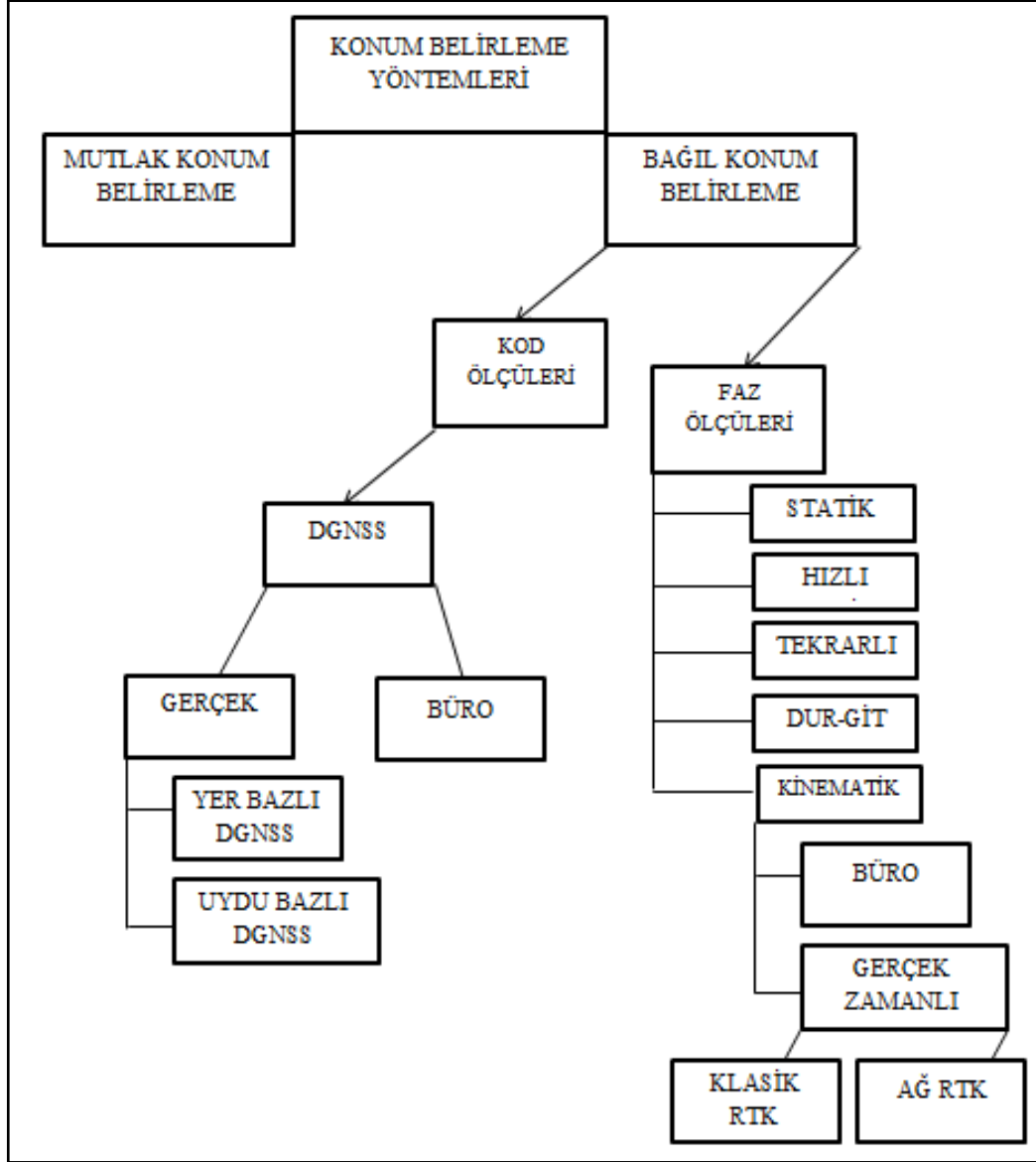
Eşitlik (4.3)’teki tüm terimler uzunluk biriminde (metre) olduğundan kullanımı daha uygundur. Saat hataları ışık hızı ile ölçeklendirilmiştir. d_{ION} , d_{TROP} r istasyonundaki iyonosferik ve troposferik etkileri, d_{TIDE} karasal gelgit ve okyanus yükleme etkilerini, d_{MP} çok yolluluk etkilerini ve d_{REL} relativistik etkileri belirtir. Kalan hatalar (alıcı gürültüsü ve rastgele hatalar) ε ile gösterilir. GNSS sinyalinin alındığı süre boyunca faz ve tamsayı hesabı sürekli biçimde modellenir. Değişen osilatör frekansına bu yolla açıklama getirilir. Fazın ölçüldüğü her zaman, izleme lup modeli içindeki katsayılar yeterli ölçüm hassasiyetini sağlamak için güncellenir [2].



Şekil 4. 1 Taşıyıcı dalga faz gözlemi [1]

4.3 GNSS İle Konumlama Yöntemleri

GNSS ile konum belirleme uydu-alıcı uzaklıklarının hesabına dayanan bir uzay geriden kestirme problemidir. Kullanılan modellere göre konumlama yöntemleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:



Şekil 4. 2 GNSS ile konumlama yöntemleri

Anten kalibrasyon çalışmasında statik görel konumlama ve faz farkı yöntemi kullanıldığından bu bölümde yalnızca bu konumlama yöntemleri açıklanmıştır.

4.3.1 Bağıl Konumlama

Bağıl (görelî) konumlamada amaç koordinatları bilinen bir noktaya göre koordinatı bilinmeyen nokta ya da noktaların koordinatlarının belirlenmesidir. Diğer bir deyişle, bağıl konumlamada iki nokta arasındaki baz vektörü belirlenmektedir. A noktası koordinatı bilinen ve B noktası koordinatı bilinmeyen nokta olsun. $\underline{X}_A$, $\underline{X}_B$ konum vektörleri ve $\underline{b}_{AB}$ baz vektörü olmak üzere Eşitlik (4.4) geçerlidir:

$$\underline{X}_B = \underline{X}_A + \underline{b}_{AB} \quad (4.4)$$

$$\underline{b}_{AB} = \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{AB} \\ \Delta Y_{AB} \\ \Delta Z_{AB} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Bağıl konumlama referans noktaları ile koordinatı bilinmeyen noktalarda eş zamanlı kod ya da faz gözlemleri yapılmasını gerektirmektedir. Bağıl konum belirleme ile elde edilen doğruluk mutlak konum belirlemeden çok daha iyi olup, alıcı tipi, ölçü süresi, gözlenen uydu geometrisi, uydu sayısı ve kullanılan efemeris bilgisine (yayın ya da hassas) bağlı olarak elde edilen doğruluk 0,001 ile 100 ppm arasında değişmektedir [1]. A ve B noktalarında, j ve k uydularına eş zamanlı olarak yapılan gözlemlerle fark gözlemleri oluşturulabilir.

4.3.2 Fark Gözlemleri

GNSS ile konumlamada kod ve faz gözlemleri olmak üzere iki temel büyüklük gözlenmektedir. Bu temel gözlemlere sıfır farklar (zero differences) adı da verilir. Kod ve faz gözlemlerinden yararlanılarak oluşturulan farklar yardımıyla alıcı saat hataları, uydu saat hataları ve faz başlangıç belirsizliği gibi birçok ortak hata kaynağı elimine edilebilmektedir.

4.3.2.1 Tekli Fark

İki noktadan aynı uyduya eş zamanlı olarak yapılan faz gözlemleri arasındaki farklardır. A ve B noktaları, j uyduyu belirtmek üzere tekli fark denklemi Eşitlik (4.7)'deki gibidir:

$$\begin{aligned}\Phi_A^j(t) + f^j \delta^j(t) &= \frac{1}{\lambda} \rho_A^j(t) + N_A^j + f^j \delta_A(t) \\ \Phi_B^j(t) + f^j \delta^j(t) &= \frac{1}{\lambda} \rho_B^j(t) + N_B^j + f^j \delta_B(t)\end{aligned}\quad (4.6)$$

$$\Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t) = \frac{1}{\lambda} [\rho_B^j(t) - \rho_A^j(t)] + N_B^j - N_A^j + f^j [\delta_B(t) - \delta_A(t)] \quad (4.7)$$

$$\begin{aligned}N_{AB}^j &= N_B^j - N_A^j \\ \delta_{AB}(t) &= \delta_B(t) - \delta_A(t)\end{aligned}\quad (4.8)$$

$$\begin{aligned}\rho_{AB}^j(t) &= \rho_B^j(t) - \rho_A^j(t) \\ \Phi_{AB}^j(t) &= \Phi_B^j(t) - \Phi_A^j(t)\end{aligned}\quad (4.9)$$

Eşitlik (4.8) ve Eşitlik (4.9)'deki kısaltmalar Eşitlik (4.7)'de yerine konursa tekli farklar eşitlik (4.10)'daki son şeklini alır:

$$\Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j + f^j \delta_{AB}(t) \quad (4.10)$$

Faz gözlemlerinin tekli farklarının alınması ile uydu saat hataları elimine edilir. Eğer tekli farklar uydular arasında aynı alıcı için oluşturulursa bu durumda alıcı saat hataları giderilmiş olur.

4.3.2.2 İkili Farklar

Kısaca aynı epokta iki farklı uydu için oluşturulan tekli farklar arasındaki farktır. A ve B noktaları, j ve k uyduları göstermek üzere Eşitlik (4.10)'a göre iki tekli fark oluşturulur.

$$\begin{aligned}\Phi_{AB}^j(t) &= \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^j(t) + N_{AB}^j + f^j \delta_{AB}(t) \\ \Phi_{AB}^k(t) &= \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^k(t) + N_{AB}^k + f^k \delta_{AB}(t)\end{aligned}\quad (4.11)$$

Bu iki tekli farkın farkı alınarak ikili farklar oluşturulur. Uydu sinyallerin eşit olduğu varsayılır.

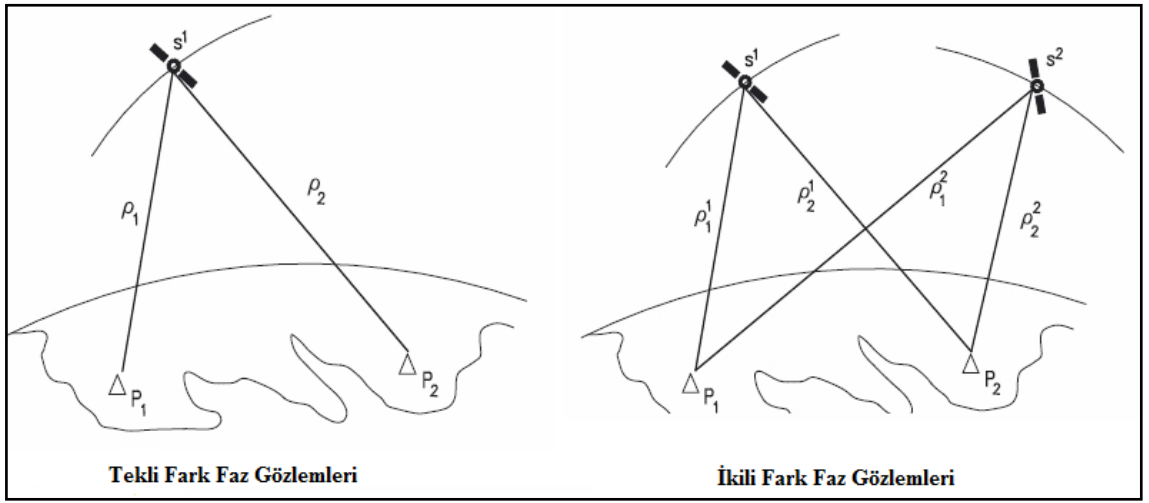
$$\Phi_{AB}^k(t) - \Phi_{AB}^j(t) = \frac{1}{\lambda} [\rho_{AB}^k(t) - \rho_{AB}^j(t)] + N_{AB}^k - N_{AB}^j \quad (4.12)$$

4.3.2.3 Üçlü Farklar

Üçlü farklar aynı uydu ve noktalar için birbirine komşu iki epok için ikili farkların farkının alınması ile oluşturulur. Eşitlik (4.13)'te en basit şekliyle üçlü farklar verilmektedir.

$$\Phi_{AB}^{jk}(t_{12}) = \frac{1}{\lambda} \rho_{AB}^{jk}(t_{12}) \quad (4.13)$$

Üçlü farkların avantajı tamsayı belirsizliklerinin elimine edilmesidir. Bu şekilde faz kesikliklerine karşı bağışıklık kazanılır.

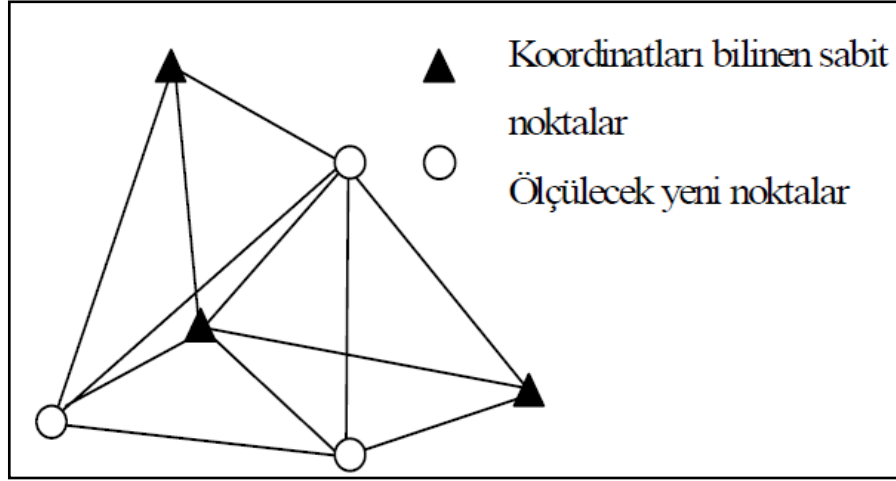


Şekil 4. 3 Fark gözlemleri [18]

4.3.3 Statik Göreli Konumlama

Statik GNSS ölçme yöntemi, yüksek duyarlık gerektiren çalışmalarda, ölçülecek baz vektörlerinin uzun olması durumunda, sistematik etkilerin (troposfer, iyonosfer) dikkate alınması gerektiğinde ve mevcut uydu geometrisinin başka bir ölçme yöntemine olanak tanımadığı durumlarda en iyi yöntemdir. Bu ölçü yönteminde iki ya da daha fazla sayıda alıcı ile en az bir saatlik eş zamanlı ölçü yapılmaktadır [1].

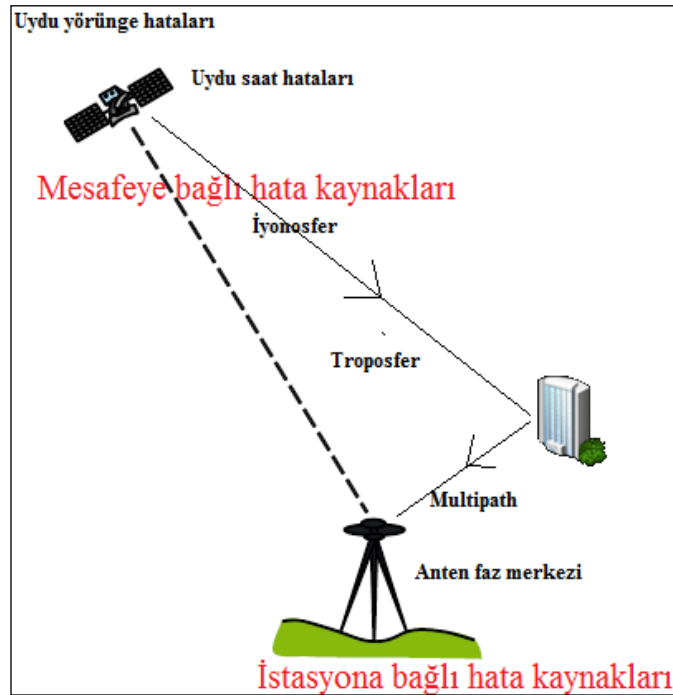
Yerkabuğu hareketlerinin belirlenmesi gibi bilimsel amaçlı çalışmalarda ve çok uzun bazların söz konusu olduğu yüksek doğruluk gereken durumlarda ölçü süreleri en az birkaç saat olmak üzere 24 saate kadar belirlenebilmektedir. Statik yöntem ile toplanan ölçüler post-process ile değerlendirilmektedir.



Şekil 4. 4 Statik görelî konumlama

4.4 GNSS İle Konumlamada Hata Kaynakları

Diğer ölçme sistemlerinde olduğu gibi GNSS ile konumlanmanın da zayıf yönleri vardır. Bu bölümde GNSS gözlemlerine etki eden temel, iyonosferik etkiler, troposferik etkiler, saat hataları, efemeris hataları, taşıyıcı dalga faz başlangıç belirsizliği, multipath etkileri, anti-spoofing, seçimli doğruluk erişimi (S/A), ölçme aletlerine ilişkin hatalar gibi, fiziksel etkiler hakkında bilgi verilmiştir.



Şekil 4. 5 GNSS hata kaynakları [18]

4.4.1 İyonosferik Etkiler

İyonosfer yeryuvarının üzerinde yaklaşık 50 km ile 1000 km arasında uzanan çeşitli tabakalardan oluşan bir katmandır. Bu katmanda atomlardan kopmuş serbest elektronların sayısı elektromanyetik dalgaların yayılmasını değiştirmeye yetecek kadar çoktur. İyonosferik etkiler GNSS ölçmelerinde önemli hata kaynaklarından biridir. GNSS sinyalinin iyonosferik gecikme ya da hızlanma miktarı bir gün içerisinde birkaç metreden onlarca metreye çıkabilmektedir. Jeomanyetik alan ve solar etkinlikler arasındaki karmaşık fiziksel etkileşimlere bağlı olarak iyonosferik etkileri modellemek kolay değildir. İyonosfer radyo dalgaları için dağıtıcı bir ortamdır ve iyonosferik etki frekansa bağlıdır. Bu özellik kullanılarak GNSS sistemi çeşitli frekanslarda çalışacak şekilde tasarlanmış ve böylece iyonosferik etkiler ölçülebilmekte ve düzeltebilmektedir. İyonlaşma doğrudan güneş ışımaya bağlıdır. Bu iyonosferik etkinin gündüzleri geceye oranla daha fazla olduğu anlamına gelir. Alıcı ile uydu arasındaki sinyal yolu boyunca toplam elektron yoğunluğu TEC olarak ifade edilir ve TEC güneş lekeleri aktivitelere, mevsimsel ve günlük değişimlere, uydu yükseklik ve azimut açısına ve gözlem noktasının konumuna bağlı olduğundan karmaşık bir büyüklüktür ve özel modellerle kestirilir. Zenit doğrultusundaki ve sinyal iletim yolu boyunca TEC değerlerinin kombinasyonunda indirgeme fonksiyonları kullanılır. TEC etkisini ve iyonosferik kırılmayı elimine etmenin en etkili yolu farklı frekanslarda iki sinyal kullanılan çift frekans yöntemidir. GNSS ölçmelerinde L1 ve L2 olarak iki taşıyıcı dalga kullanılmasının ana amacı iyonosferik etkinin giderilmesidir.

Faz ve kod ölçülerindeki iyonosferik etkilerin büyüklüğü hemen hemen aynıdır fakat ters işaretlidir. Kod ölçüleri için iyonosferik etki $+\Delta^{ION}$ olarak modellenirken faz ölçüleri için $-\Delta^{ION}$ olarak modellenir. Kod ölçüleri için grup gecikme etkisi söz konusuysa faz ölçüleri için faz hızlanması söz konusudur.

GNSS uydu mesajları kestirilen iyonosferik modele ilişkin parametreler içerir [3]. Bu model parametreleri kullanılarak iyonosferik gecikmenin %50'den fazlası giderilebilir [3]. Birinci mertebeden iyonosferik etkiler çift frekans GNSS faz gözlemleri ve GPS faz gözlemlerinin doğrusal kombinasyonları (L3 iyonosfer-free çözümü) ile elimine edilebilir. İkinci mertebeden iyonosferik etkiler üçlü frekans kombinasyonları ile elimine edilir. Kısa bazlarda ikili farklar alınarak iyonosferik etkiler elimine edilir.

4.4.2 Troposferik Etkiler

Troposfer atmosferin en alt tabakasıdır. İyonosferden geçen sinyaller sırasıyla mezosfer, stratosfer ve troposfer tabakalarından ilerler. Kalınlığı kutuplarda yaklaşık 8 km, ekvatorunda yaklaşık 18 km'dir. Hava olayları troposferin 3-4 km'lik alt kısımlarında görülmektedir. İyonosferden farklı olarak troposfer 15 GHz'a kadar radyo dalgaları için, yani GNSS taşıyıcı frekansları için dağıtıcı bir ortam değildir. GNSS sinyal iletimine etkileyen troposferik etkiler frekanslardan bağımsızdır. Elektromanyetik sinyaller troposferdeki nötr atom ve moleküller tarafından etkilenirler. Bu etkiler troposferik gecikme ya da troposferik kırılma olarak adlandırılır. Troposferik gecikmenin %90'ı kuru bileşenden, %10'luk kısmı ıslak bileşenden oluşmaktadır [28]. Kuru bileşen kuru atmosferden ve ıslak bileşen su buharından kaynaklanır. Islak bileşeni modellemek su buharının konuma ve zamana göre kuvvetli değişimler göstermesinden dolayı daha zordur. Su buharı basıncı dağılımı çok değişken olup bu değişimler kuru bileşene göre yaklaşık 3 kat daha fazladır. Troposferik gecikmenin zenit doğrultusundaki miktarı yaklaşık 2 m'dir. GNSS sinyalinin zenit açısı ne kadar büyükse bu sinyal atmosferde zenit doğrultusuna göre daha uzun bir yol izler. Islak ve kuru bileşenlere etkileri de daha fazla olur. Bu artım miktarı $1/\cos Z$ kadardır. Zenit doğrultusundaki gecikme miktarında yararlanarak herhangi bir zenit açısı doğrultusundaki değerin hesaplanmasını sağlayan bu fonksiyona indirgeme fonksiyonu (mapping function) adı verilir.

Troposferik gecikme sıcaklık, basınç, nemlilik gibi etmenlerle beraber GNSS anteninin konumuna bağlıdır. Faz ve kod ölçülerine etkisi aynı büyüklüktedir ve GNSS alıcılarının çift frekans özelliğinden faydalanarak bu etkiyi gidermek mümkün değildir. Ticari yazılımlarda troposferik gecikme etkisini giderebilmek için geliştirilen modellerden sıklıkla kullanılanları Saastamoinen (1973), Hopfield (1969) ve Goad Goodman (1974)'tür [29].

4.4.3 Uydu Saat Hataları

Uydularda atomik saatler bulunur. Bu saatlerin oldukça kararlı olmalarına rağmen uydu saati ile GPS zamanı arasındaki sapma 300 km pseudo-uzaklık değerine tekabül eden 1ms değerine kadar çıkabilir. Ana kontrol istasyonu saat düzeltme parametrelerini belirler ve navigasyon mesajıyla yayınlanmak üzere uydulara yükler. Bu düzeltme parametreleri alıcı tarafından ikinci dereceden bir polinom ile uygulanır [30]:

$$\Delta t_{clk} = a_{f0} + a_{f1} + (t - t_{oc}) + a_{f2}(t - t_{oc})^2 + \Delta t_r \quad (4.14)$$

Uydu saat hataları uydunun yönünden bağımsızdır ve ölçü yapılan tüm noktalardaki alıcılar için aynı büyüklüğe sahiptir. Uydu saat hatası düzeltmelerinin temel nedeni uydu-alıcı uzaklığının hesaplanmasındaki toplam hatayı olabildiğince azaltmak, bunun için ise uydu saatleri ile GPS zamanı arasındaki yaklaşık 30 nano saniyelik senkronizasyonu sağlamaktır.

Alıcı saat hatası, alıcı saatinin GPS zamanından farklı olması veya GPS saatinin kendisinden kaynaklanan hatalardan meydana gelebilir. Alıcı saat hatası her bir epok için ayrı ayrı da hesaplanabilir. Eğer alıcı saat hatası ihmal edilirse konumda km'lerce hata oluşabilir. Saat hataları ölçülerin farklarını alarak ölçülerden atılabilir. Ayrıca uydu saat hataları hassas efemeris dosyalarında IGS tarafından yayınlanır.

4.4.4 Uydu Efemeris Hataları

GPS navigasyon mesajı içerisinde yayınlanan uydu konum bilgilerinin doğruluğunun düşük olduğu ya da kasıtlı olarak yanlış yayınlanması durumunda karşılaşılan hataya efemeris hatası denir. Saat hatalarının istenmeyen etkileri saatlerin geliştirilmesi ya da bunun yerine iki ya da daha fazla alıcı ile uydulara eş zamanlı gözlemler yaparak ve fark gözlemleri oluşturularak elimine edilebilir veya büyük ölçüde giderilebilir. Diğer taraftan efemeris hataları uydu yörüngelerinin daha iyi kestirimini gerektirir. Bu da uydulara etki eden kuvvetlerin çok iyi ölçülmesi ya da modellendirilmesine bağlıdır.

Efemeris hatası radyal, teğet ve çapraz yörünge hataları olmak üzere üç bileşenle ifade edilir. Bu bileşenlerden en küçük etkiye sahip olan radyal hatadır. Ancak, uydu-alıcı uzaklıklarının hesabında etkili olan hata kaynağı da radyal bileşendir.

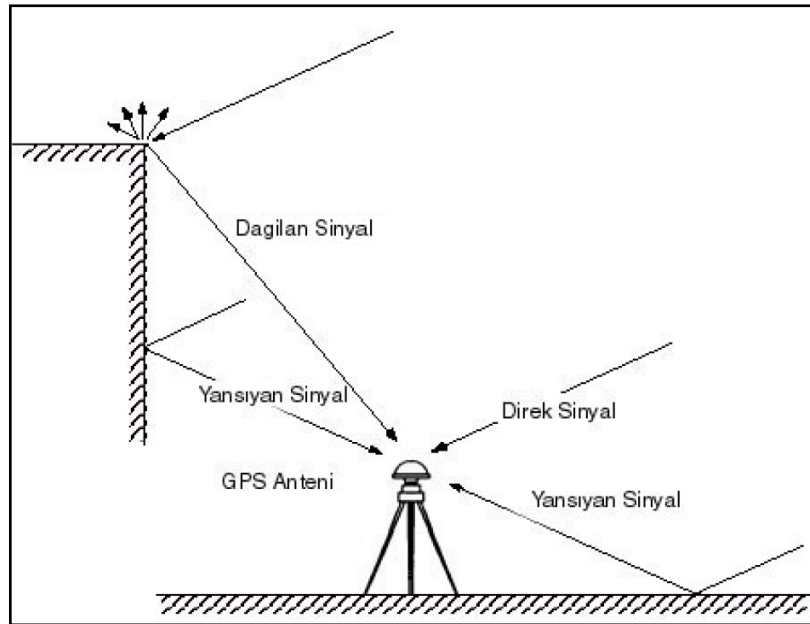
Bağıl konumlamada sistematik yörünge hataları iki ya da daha fazla noktadan aynı uydulara eş zamanlı gözlemler yapılarak ve fark gözlemleri oluşturularak giderilebilir ya da büyük ölçüde indirgenebilir. Birkaç kilometrelik baz uzunlukları için efemeris hatasının etkisi oldukça küçüktür. Ancak, baz uzunluklarının çok fazla olduğu durumlarda bu hatanın büyüklüğü önemli ölçüde artmaktadır. 20 metrelik bir yörünge hatası baz çözümünde 1 ppm'lik hataya neden olur [31]. Uzun baz çözümlerinde ise efemeris hatalarından kaçınmak için hassas efemeris parametreleri kullanılmalıdır.

Çizelge 4. 1 Efemeris hataları nedeniyle ölçülen kenarlardaki hata oranları [1]

Efemeris hatası (m)	Baz uzunluğu (km)	Baz hatası (ppm)	Baz hatası (mm)
2,5	1	--	--
2,5	10	0,1	1
2,5	100	0,1	12
2,5	1000	0,1	124
0,05	1	--	--
0,05	10	--	--
0,05	100	0,002	0,2
0,05	1000	0,002	2,5

4.4.5 Multipath (Çok Yolluluk) Hatası

Çok yolluluk etkisi uydudan yollanan sinyalin birden çok farklı yolla alıcı antenine ulaşmasıdır. Faz ve kod ölçülerinin her ikisini de etkilemektedir. Esas olarak alıcı etrafındaki yansıtıcı yüzeylerden kaynaklanmakla beraber sinyal iletimi sırasında uydudaki yansımalar da çok yolluluğa neden olabilmektedir.



Şekil 4. 6 Çok yolluluk etkisi

Multipath etkisi doğrusal olmayan sinyalin gözlemler üzerine etkisidir. Farklı alıcılar farklı yollara sahip sinyallerle uğraştığından bu etki alıcı yapısına yüksek dereceden bağımlıdır.

Multipath etkisi P kod ölçüleri için 15 m'ye ve C/A kod ölçüleri için 150 m'ye ulaşabilir. Chip uzunluğunun daha kısa olmasından dolayı P kodu doğrusal olmayan sinyallere C/A kodundan daha az duyarlıdır. Genellikle taşıyıcı fazlarda multipath hatası birkaç cm civarındadır.

GNSS sinyalleri ve de dolayısıyla antenleri sağ el dairesel polarizasyona (RHCP) sahiptir. Yansıyan sinyallerin polarizasyonu değişeceğinden bu özellikten faydalanarak multipath sinyalleri engellenmek istenir. RHCP antenler tarafından alınan yansıyan sinyaller genellikle doğrudan alınan sinyallerin 1/3'ü kadarlık bir sinyal gürültü oranına sahiptir [2]. Bu özellikte multipath etkilerini belirlemede kullanılabilir.

Multipath etkilerinden kaçınmanın en kolay yolu anten kurulumunda yansıtıcı yüzeylerden olabildiğince kaçınılmasıdır. Yalnızca taşıyıcı faz ölçülerinin kullanılması da mümkündür.

Bağıl konumlamada multipath etkilerinin faz ölçüleri üzerine etkileri yeterli ölçüm süresine ve iyi uydu geometrisine sahip olunması durumunda genellikle 1 cm'den fazla değildir. Bu durumlarda bile alıcı yüksekliğindeki basit bir değişim multipath etkisini artırabilir ve sonuçları bozabilir [2].

Sinyal polarizasyonu avantajını kullanan bir anten seçilerek multipath etkileri elimine edilebilir. Anten kazanç modeli halkalarla (choke ring) geliştirilebilir ve özel anten tasarımları ve dizileri oldukça etkilidir [2]. Multipath indirgemesi dijital filtreleme, geniş bantlı antenler, radyo frekans emici anten yer düzlemleri (ground plane), hem L1 hem de L2 bantları için optimum multipath engelleme sağlayan gelişmiş çift frekanslı choke ring antenler ile gerçekleştirilebilir.

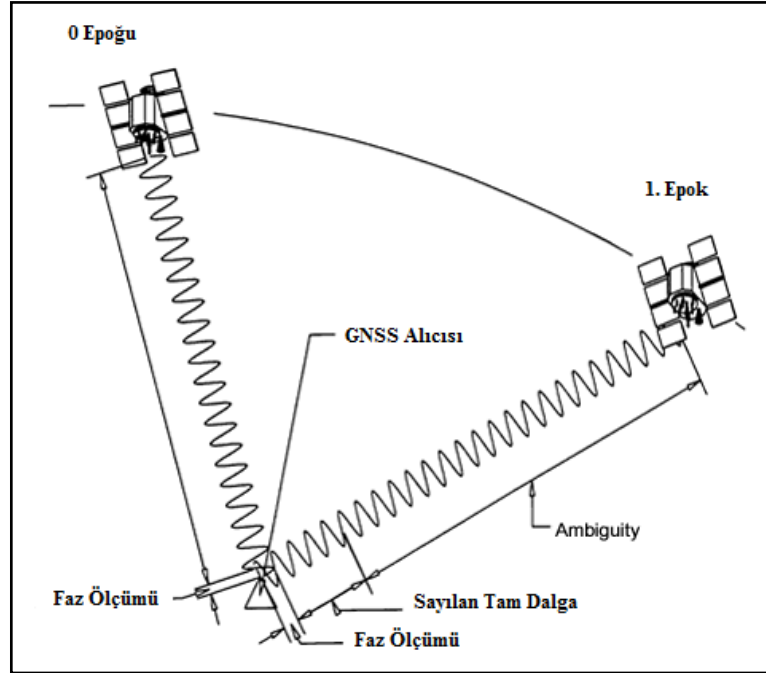
4.4.6 Taşıyıcı Dalga Faz Başlangıç Belirsizliği ve Faz Kesiklikleri

Taşıyıcı dalga faz gözlemlerinde temel prensip kod ölçüleri ile aynı olmasına karşın kod gözlemlerinde kodun “chip” uzunluğu ölçülürken faz gözlemlerinde taşıyıcı dalganın dalga boyları (cycles) sayılmaktadır.

Bir alıcı açıldığında, uydudan gönderilen sinyal ile alıcıda üretilen sinyalin faz farkının kesirli kısmı gözlenir ve tam sayı sayacı başlatılır. Sinyal alımı boyunca kesirli faz $2\pi-0$

aralığında değiştiğinde sayaç bir dalga boyu artış gösterir. Böylelikle ilk ölçü epoğundan itibaren fazdaki tam sayı dalga boyu değişimleri belirlenmiş olur.

Bununla birlikte başlangıç için uydu ile alıcı arasındaki taşıyıcı dalga fazının kaç tam dalga içerdii bilinmemektedir. Bu belirsizliğe taşıyıcı dalga faz başlangıç belirsizliği adı verilir. N ile gösterilir. Sinyal kesilmesi olmadığı sürece N değişmez. Faz ölçülerinde sinyal alınmasında karşılaşılan bir kesilmeye faz ölçümü yeniden başlatılır (Tam dalga sayımı sinyal kesilmesi nedeniyle yeniden başlar). Bu sinyal kesilmesine faz kesikliği adı verilir. Faz kesikliklerinin başlıca üç nedeni vardır. Ağaç, bina, köprü, dağ vb. uydu sinyallerinin alıcıya ulaşmasını engelleyen nesneler faz kesilmesine en sık neden olan etmenlerdir. Bunun dışında kötü iyonosferik şartlardan, multipath ve düşük uydu yükseklik açılarından kaynaklanan düşük sinyal-gürültü oranı ve alıcı yazılımında oluşabilecek arızalar da faz kesikliklerine neden olur [2].



şekil 4. 7 Taşıyıcı dalga faz başlangıç belirsizliği

20 km'yi geçmeyen kısa bazlarda faz belirsizliği ve faz kesiklikleri mevcut GNSS yazılımlarında tamamen otomatik olarak çözülmüştür. Faz ölçülerinden yüksek doğruluklu sonuçlar elde edebilmek için faz belirsizliklerinin doğru olarak çözümlenmesi gerekmektedir. Bunun için de yeterli sayıda ölçü toplanmış olmalıdır.

Faz başlangıç belirsizliği çözümünde geometrik yöntem, en küçük kareler yöntemi gibi klasik yöntemler, P kod destekli yöntem, anten yer değiştirmesi ve QIF, LAMBDA gibi modern yöntemler kullanılmaktadır.

4.4.7 Uydu Anteni Faz Merkezi Değişimi

Sinyal gönderilme anındaki uydu ile sinyalin alındığı zamandaki alıcı arasındaki geometrik uzaklık alıcı ve uydu antenlerinin faz merkezleri arasındaki mesafedir. Bununla beraber uydu konumunu belirten yörünge verisi genellikle uydu kütle merkezine dayanmaktadır. Bu nedenle hassas uygulamalarda uydu koordinatlarına kütle merkezi düzeltilmesi adı da verilen uydu anten faz merkezi düzeltmeleri getirilmelidir. Uydu anteni faz merkezi dosyaları yine IGS tarafından yayınlanmaktadır ve hassas uygulamalarda akademik GNSS değerlendirme yazılımlarında göz önünde bulundurulurlar.

4.4.8 Alıcı Anteni Faz Merkezi Değişimi

Antenlerin faz merkezi radyo sinyallerinin anten tarafından alındığı noktalardır. Genellikle antenin geometrik merkezi ile çakışmazlar. Anten faz merkezi ötelemeleri uydu yükseklik ve azimut açıları ile uydu sinyalinin şiddetine bağlıdır ve L1 ve L2 için birbirinden farklı değerlere sahiptir. Başka bir deyişle, L1 ve L2 faz merkezleri birbirinden farklı olup, aynı zamanda bu faz merkezleri laboratuvar koşullarında üretici firma tarafından belirlenen geometrik merkezden de farklıdır.

Anten faz merkezi değişimlerini belirlemek zordur. Çünkü anten faz merkezi her anten modeli ve yapısı için farklıdır. Aynı yapı elemanlarından oluştuğu kabul edilen aynı tip antenin kullanılması ve aynı yöne yönlendirilmeleri durumunda kısa baz mesafelerinde faz merkezi hatası elimine olmaktadır. Faz merkezi hatasının etkisi GNSS ölçülerinde farklı anten tiplerinin kullanılması ve antenlerin farklı yönler yönlendirilmeleri durumunda ortaya çıkmaktadır. Uzun baz mesafelerinde yerin küreselliği nedeniyle antenlerin aynı yöne yönlendirilmeleri mümkün olmamaktadır [4]. Farklı GNSS alıcı antenlerinin kullanıldığı ölçü kampanyalarında IGS ve NGS tarafından yayınlanan anten faz merkezi dosyaları kullanılmalıdır.

Jeodezik antenlerde esas problem düşey bileşendedir. Bu nedenle ortalama faz merkezleri anten referans merkezine göre çok iyi bilinmeli ve arazide yapılan anten yüksekliği ölçümleri yeterli titizlikle ve mm duyarlılığında yapılmalıdır.

GNSS ile konumlamada bunların dışında (S/A) adı verilen yetkisiz kullanıcıların GNSS'in sağladığı doğruluklara ulaşmasını engellemek amacıyla navigasyon dosyasında yayınlanan uydu yörünge bilgileri ya da uydu saati frekansı ile oynayarak

konum belirleme doğruluklarının ABD tarafından kasıtlı olarak kötüleştirilmesini ifade eden seçimli doğruluk erişimi, okyanus gelgitlerinin alttaki yerkabuğuna baskısı olarak tanımlanan okyanus yüklemeleri, karasal gelgit, kutup gezinmesi ve hassas konumlama servisine yetkisi olmayanların erişimini engellemek amacıyla P kodunun Y kod olarak kriptolandığı AS etkisi (Anti Spoofing) gibi hata kaynakları mevcuttur. S/A etkisi 1 Mayıs 2000 tarihinde uygulamadan kaldırılmıştır.

GNSS ANTENLERİNİN KALİBRASYONU

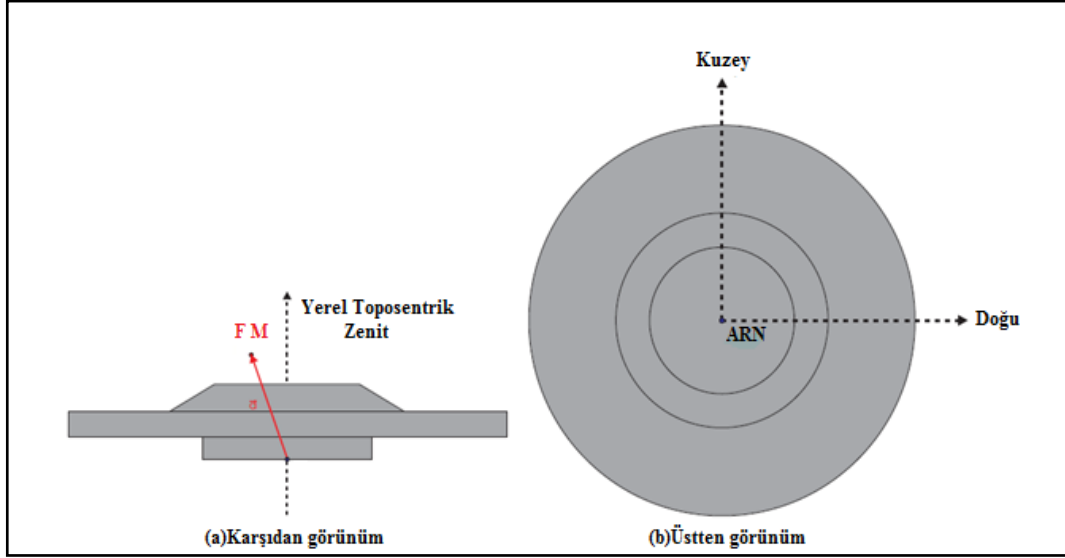
Bu bölümde GNSS anten kalibrasyonunun temel prensip ve kavramları açıklanmış, farklı kalibrasyon yöntemleri ve anten kalibrasyonunun matematiksel modeli hakkında bilgi verilmiştir.

5.1 Anten Faz Merkezi ve Değişimi

GNSS alıcıları ile gerçekleştirilen her bir ölçüm kullanılan antenin elektriksel faz merkezi ile ilişkilidir. Antenin elektriksel faz merkezinin konumu gelen sinyalin frekansına, gücüne ve doğrultusuna bağlıdır [32]. İdeal bir GNSS anteni; sinyallerin ışınsal olarak simetrik küresel dalga şeklinde alındığı ve antenlere özgü hatalar tarafından distorsiyona uğramamış noktasal bir faz merkezi ile karakterize edilen antendir [33]. Fakat antenin elektromanyetik özelliklerinden dolayı ideal küresel faz cephesinde distorsiyona neden olan bir faz hatası meydana gelir. Bir GNSS anteninin faz merkezini tanımlamak için tüm ölçülen taşıyıcı fazların anten üzerinde bir noktada toplandığı varsayılırsa bu noktaya anten faz merkezi denir.

GNSS ile gerçekleştirilen bir jeodezik baz çözümünde; baz vektörü, bazın her iki ucundaki antenlerin faz merkezleri arasındaki vektördür. Bununla beraber GNSS antenlerinin faz merkezi fiziksel ve sabit bir nokta değildir. Tüm GNSS antenleri için faz merkezi, antenin uydu sinyalini aldığı doğrultunun bir fonksiyonudur [10]. Bu gerçek bir antenin iyi tanımlanmış tek bir faz merkezine sahip olmadığı anlamına gelir. Anten faz merkezinin fiziksel olarak tanımlanamaması nedeniyle pratikte mekanik bir nokta olan anten referans noktası (ARN) kullanılır. Tüm dış merkezleştirmelerde, özellikle anten yüksekliğinin ölçümünde ARN referans alınır. Uluslararası GNSS Servisi (IGS) tanımlamasına göre ARN antenin altında ve düşey eksen üzerinde bulunmaktadır [4].

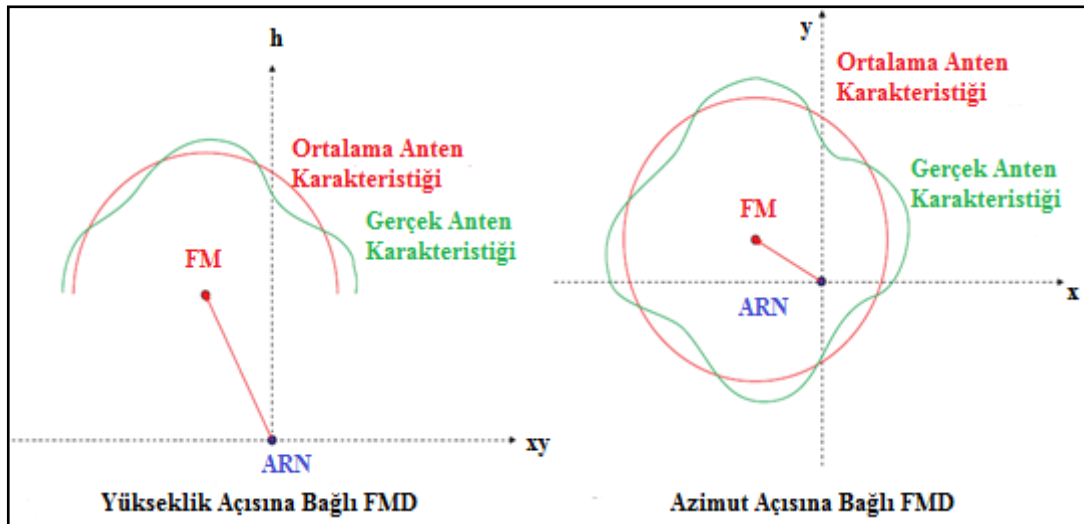
Anten etkileri faz merkezi ötelemeleri (FMO) ve faz merkezi değişimleri ile ifade edilir. Bu etkiler değişikliğe uğramamış antenler için sabit olduğundan dolayı antenler kalibre edilebilirler [12]. Ortalama bir elektromanyetik faz merkezinden sapmalar faz merkezi değişimi (FMD) olarak adlandırılır. Faz merkezi (FM) değişimi alıcı antenin tasarım özelliklerine bağlıdır. FMD gelen sinyalin frekansına, azimutuna ve yükseklik açısına bağlıdır [33].



Şekil 5. 1 GNSS anteni faz merkezi tanımı

Anten faz merkezi ötelemesi, anten uzayında tanımlı sabit bir koordinat sisteminde anten referans noktasından faz merkezine olan vektördür. Anten koordinat sisteminin orijini ARN'yi, x eksenini kuzeyi, y eksenini doğuyu ve z eksenini de yerel toposentrik zenit doğrultusunu gösterir. Bu şekilde faz merkezi ile referans noktası arasındaki koordinat farkı belirtilir. Bu vektörün üç bileşeni (a_x , a_y , a_z) L_1 ($f_1=1575,42$ MHz) ve L_2 ($f_2=1227,6$ MHz) taşıyıcı fazları için ayrı ayrı belirlenir; x kuzey yönündeki bileşen (Northing), y doğu doğrultusundaki bileşen (Easting) ve h düşey ötelemedir (Up) [34].

Fazın alındığı tüm noktalar küresel bir dış görünüm oluşturur. Faz merkezi kürenin merkezindedir. Bununla beraber gelen sinyaller çeşitli etkilere maruz kalır ve küresel dış görünümün simetrik şekilden farklılıklar gösterir ve faz merkezi kürenin merkezi olarak kabul edilemez. Daha gelişmiş bir modellemeye ihtiyaç duyulur. Bu model sinyallerin antene ulaştığı doğrultuya bağlıdır [33]. Faz merkezi değişimlerinin çoğu uydu yükseklik açısına bağlıdır. Azimuta bağlı değişimler anten tipine bağlıdır ve yüksekliğe bağlı değişimlerden daha küçüktür [10], [34].



Faz düzeltmelerinin belirlenmesi genel olarak iki adımda gerçekleştirilir. İlk olarak faz merkezi ötelemesi olarak bilinen ortalama faz merkezinin konumu anten referans noktasına göre belirlenir. İkinci adımda gelen sinyalin uydu yükseklik açısına ve azimutuna bağlı olan düzeltme terimi belirlenir. Bu işlemin matematiksel ifadesi genellikle polinomlar ile ya da küresel yüzey fonksiyonları ile gerçekleştirilir. Faz merkezinin belirlenmesi kullanılan yükseklik açısına ve değerlendirme stratejisine bağlıdır.

Faz merkezi ötelemesi ve doğrultuya bağımlı faz merkezi hatasının ölçülen uzunluğa etkisi aşağıdaki eşitlik ile tanımlanır:

$$dr(\alpha, \beta) = a \cdot r_0 + \lambda \cdot d\phi(\alpha, \beta) \quad (5.1)$$

a = Anten referans merkezine göre faz merkezi öteleme vektörü

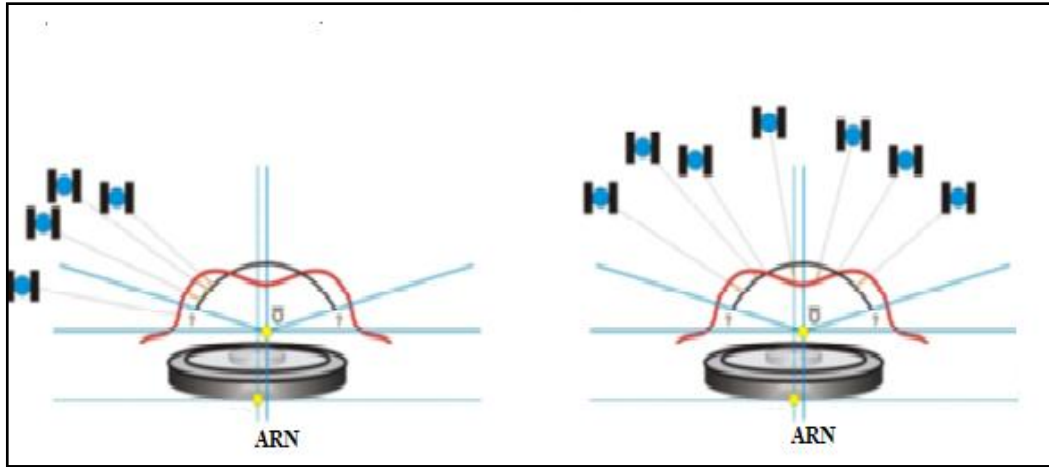
r_0 = Yükseklik açısı β , azimut açısı α olan uydu yönündeki birim vektör

$d\phi(\alpha, \beta)$ = Doğrultuya bağlı faz merkezi değişimi

λ = Sinyalin taşıyıcı dalga boyu

Anten düzeltmelerinin pratikte kullanımı aşağıdaki gibidir [36]:

- Faz merkezi ötelemesinin yükseklik bileşeni
- Faz merkezi ötelemesi yükseklik ve konum bileşenleri
- FMO + yükseklik açısına bağlı FMD
- FMO + yükseklik ve azimut açılarına bağlı FMD



Şekil 5. 4 Ofset belirleme ve yalnızca FMO düzeltmesi problemi [37]

Yalnızca faz merkezi ötelemelerinin göz önünde bulundurulması yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda tavsiye edilmez. FMD düzeltmelerinin göz ardı edilmesi özellikle troposferik parametrelerin kestirilmesi sırasında birkaç cm değerine ulaşan yükseklik hatalarına neden olabilir. Ayrıca yalnızca FMO değerlerinin belirlenmesi değişkendir ve sürekliliği sağlamaz (Şekil 5.4). Ötelemeler kullanılan gözlemlere ve dolayısıyla uydu yükseklik açısının fonksiyonuna, konuma, uydu dizilimine ve gözlem süresine bağlıdır. Doğrudan faz gözlemlerinden ya da faz merkezi değişimlerinden kestirilebilirler [37].

Kısa bazlarda aynı tür antenlerin kullanılması ve antenlerin aynı yöne yönlendirilmesi ile anten faz merkezi hataları elimine edilir. Herhangi bir düzeltmeye gerek duyulmaz. Bu nedenle antenler kuzeye yönlendirilmektedir. Yine kısa bazlarda aynı anten türleri özellikle RTK çalışmalarında farklı yönelmelere sahip olabilirler. Bu durumda anten düzeltmelerinin uygulanması şarttır. Baz mesafeleri birkaç 100 km'yi bulan ağlarda, antenlerin kuzeyleri birbirine paralel değildir. Aynı uydu farklı istasyonlardan farklı açılarla gözlemlenir. Bu nedenle FMO düzeltmelerine ilaveten azimut ve yükseklik açısına bağlı mutlak FMD düzeltmeleri de kullanılmalıdır.

5.2 Kalibrasyon Yöntemleri

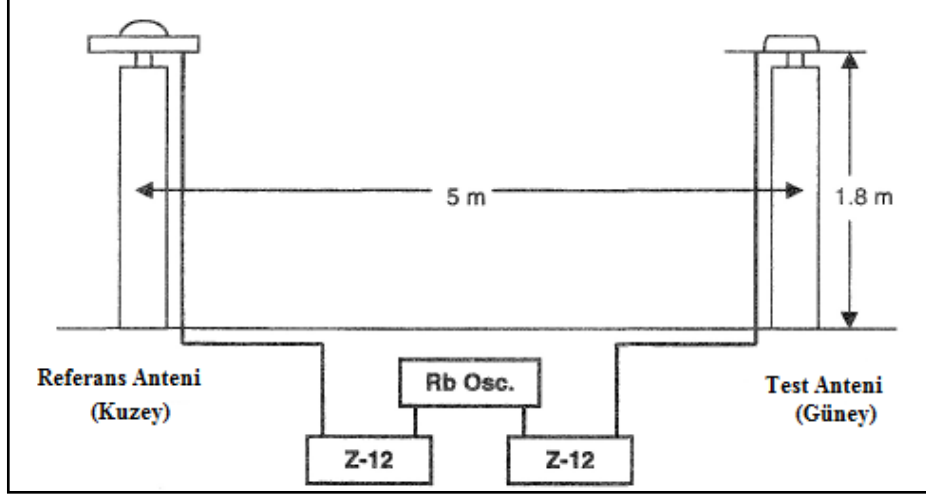
Anten kalibrasyonları arazi ve laboratuvar ya da bağıl ve mutlak yöntemler olarak iki sınıfa ayrılabilir. Literatürde her ikisi de kullanılmaktadır. Yöntem olarak bağıl kalibrasyon ve mutlak kalibrasyon olarak ayrılabilirken, ölçme ortamı olarak arazide gerçek GNSS sinyalleri kullanılarak gerçekleştirilen kalibrasyonlar ve laboratuvar ortamında gerçekleştirilen kalibrasyonlar olarak sınıflandırılabilir.

5.2.1 Bağıl Kalibrasyon Yöntemi

Arazi ölçümleri ile bağıl faz merkezi konumu belirlenir. Bağıl kalibrasyon yönteminde, faz merkezi ötelemesi ve değişimleri belirlenmek istenen antenin kalibrasyonu bir referans antenine göre gerçekleştirilir ve bu yöntem koordinatları yüksek doğrulukla bilinen iki nokta arasındaki bazın gözlenmesi prensibine dayanır. Bağıl kalibrasyon işlemleri NGS tarafından gerçekleştirilmektedir ve referans anteni olarak JPL tarafından tasarlanan AOAD/M_T Alan Osborne choke ring anteni kullanılmaktadır. Bu antenin faz merkezi değişimlerinin 0 olduğu varsayılmış ve L1, L2 ötelemeleri sırasıyla 11 cm ve 12,8 cm olarak tanımlanmıştır [10]. Yine yatay FMO bileşenleri 0 olarak alınmıştır. NGS bağıl kalibrasyonlarının tümünde (tüm anten tipleri için) AOAD/M_T anteni referans olarak alınmıştır. Kısa baz mesafesi nedeniyle atmosferik etkiler ve uydu yörünge hataları elimine edilir. Yine uzun gözlem süresi sayesinde multipath etkisi büyük ölçüde giderilir. NGS kalibrasyonları anten döndürme işlemini içermez.

Bağıl kalibrasyon çalışmalarını gerçekleştirmek için Corbin, Virginia'da aralarındaki uzaklık 5 m olan, 1,8 m yüksekliğinde iki beton pilye tesis edilmiştir. Pilyeler kuzey-güney doğrultusundadır. Referans ve test antenleri Ashtech Z12 alıcılarına bağlıdır ve

yükseklik açısı multipath etkilerinden kaçınmak amacıyla 10^0 seçilmiştir. Rubidyum osilatör iki alıcı içinde dış frekans standardını sağlar.



Şekil 5. 5 NGS anten kalibrasyon test alanı [10]

Her bir frekans için ilk olarak anten FMO değerleri ikili fark gözlemleri ile kestirilmiştir ve gelen sinyalin yükseklik açısına göre anten FMD değerleri tekli farklar ile elde edilmiştir.

Anten döndürülmesi ile gerçekleştirilen bağıl kalibrasyonlarda, kalibre edilecek antenin mutlak konumunun bilinmesi gerekmez. Bu tür çalışmalarda koordinatlar antenlerin birden fazla yönelmeye sahip olduğu yüksek doğruluklu gözlemlerle belirlenebilir. Yalnızca iki anten arasındaki yükseklik farkı çok hassas olarak belirlenmelidir [33]. FMO değerlerinin kestirimi FMD'den ayrı olarak gerçekleştirilir. Analizlerde hesaplanan yükseklik farkı nivelman işlemi ile bulunan yükseklik farkı ile karşılaştırılır. Hesaplanan bu fark Eşitlik (5.1)'deki a vektörünün yükseklik bileşenini ifade eder. Bu yöntemle eğer referans anteninin mutlak kalibrasyonu gerçekleştirilmişse test anteninin mutlak parametreleri belirlenebilir [33].

Uluslararası GNSS Servisi (IGS) tarafından bağıl faz merkezi modelleri 30 Haziran 1996 tarihinden 6 Kasım 2006 tarihine kadar kullanılmıştır [38]. Bağıl anten kalibrasyonları cm mertebesindeki hatalardan kaçınmak için gereken niteliklere sahiptir fakat kalıcı bir çözüm değildir. Bağıl kalibrasyonlar yalnızca kısa baz uzunluklarında geçerlidir [39]. Uzun bazlarda ise bir uydu iki noktadan önemli derecede farklı yükseklik açıları ile gözlemlenir. Bu nedenle bağıl FMD değerleri yeterli değildir [10].

Bağıl anten kalibrasyonun yönteminin zayıf tarafları şunlardır:

- Anten faz merkezi değişimlerinin 10^0 yükseklik açıları ile kestirilmesi
- Referans anteninin FMO ve FMD değerlerinin düşük doğrulukla bilinmesi
- Anten FMD kestiriminde azimut açılarının göz önünde bulundurulmaması

5.2.2 Mutlak Kalibrasyon Yöntemi

Mutlak anten kalibrasyonları arazi kalibrasyonları ve ekosuz oda testleri şeklinde olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilir.

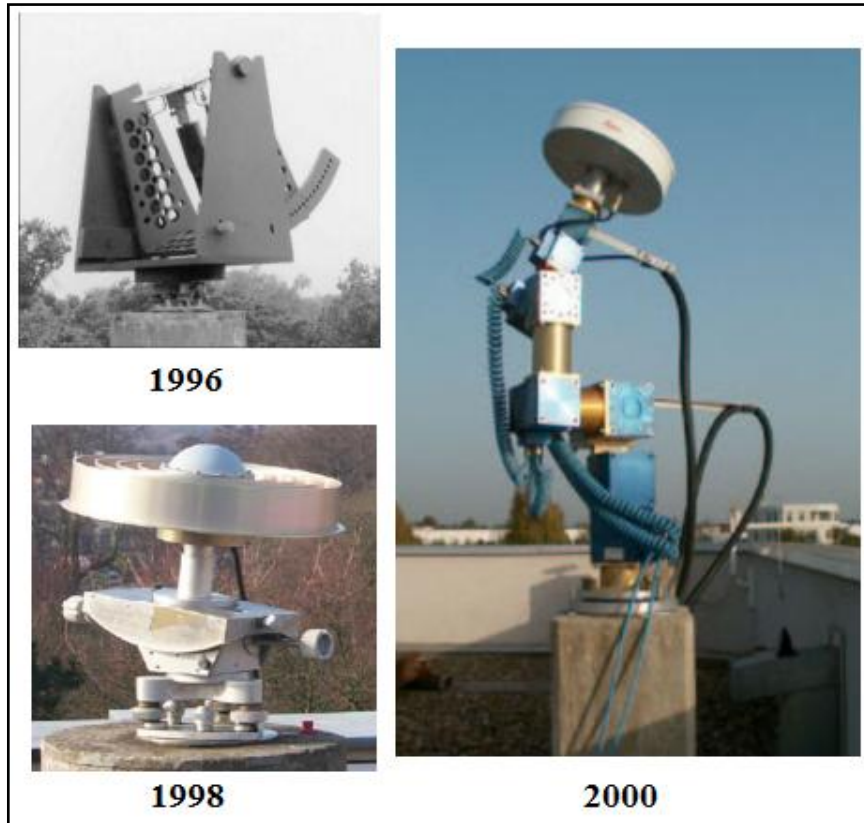
Ekosuz oda ölçümleri ile belirlenen ilk anten faz merkezi düzeltmelerinin uygulanması global GPS çözümlerinde, VLBI ve SLR çözümleri ile karşılaştırıldığında, yaklaşık 10 cm değerine karşılık gelen 15 ppm'lik anlamsız derecede büyük bir ölçek değişimine neden olmuştur [9]. Bu ölçek değişimi, IGS bağıl FMD değerleri kullanılması durumunda ortaya çıkmayan, modellenmemiş bir sistematik etkiye dikkat çekmektedir. Bu ölçek hatasının sebebini araştırmak için çok sayıda çalışma yapılmıştır ve nedenin mutlak anten faz merkezi düzeltmesinin kullanılması değil, uydu anten kalibrasyon bilgisindeki eksiklikten kaynaklandığı anlaşılmıştır [38]. Bunun yanı sıra referans anteni AOAD/M_T'nin mutlak FMD değerlerinin IGS tarafından kullanılan değerlerden tamamen farklı olması nedeniyle IGS tüm avantajlarına rağmen mutlak kalibrasyonu resmi kalibrasyon yöntemi olarak kabul etmemiştir.

2004 yılında İsviçre'nin Bern şehrinde gerçekleştirilen IGS çalıştayında global GPS ağı ile ITRF ağı arasındaki ölçek farkı tartışılmış ve sonuç olarak uydu antenlerinin kalibrasyonlarının gerçekleştirilmesi durumunda mutlak kalibrasyonun resmi kalibrasyon yöntemi olmasına karar verilmiştir. 6 Kasım 2006'da yeni referans çerçevesi ITRF05'in uygulanması ile birlikte bağıl FMD değerlerinden mutlak FMD değerlerine geçişi gerçekleştirmiştir [40]. Birçok uygulama ve ürün için, hataların ayırt edilme kabiliyeti geliştirildiği ve sistematik etkiler giderildiği için, mutlak düzeltmeler performansın artmasını sağlamıştır. Bu yüzden yerel RTK ağlarından global ağlara tüm uygulamalarda mutlak düzeltmelerin kullanılması yararlıdır.

Robot kullanılarak, mutlak GNSS anten kalibrasyonları Geo++ tarafından 2000 yılından beri gerçekleştirilmektedir. Kalibrasyon sistemi aynı zamanda antene ilişkin ek

parametrelerin, anten/alıcı kombinasyonunun ve noktaya bağı çok yolluluk etkilerinin belirlenmesi için mükemmel bir araçtır.

GNSS anten kalibrasyon sisteminin ana kısmı, birkaç bin farklı yönelmeye sahip gözlemlere olanak sağlayan robottur. Bir kalibrasyon süresince farklı anten yönelmelerinin ortalama toplamı, başlangıç zamanı ve uydu dizilimine bağı olarak 6000 ile 8000 arasındadır. Özellikle bu yöntemle azimuta bağı FMD değerleri güvenilir ve doğru şekilde belirlenir. Ölçme programı otomatiktir ve bir ölçüm birkaç saat sürmektedir.



Şekil 5. 6 Mutlak kalibrasyon robotları (Hannover Üniversitesi)

Kalibrasyon işlemi sıfır fark gözlemlerine dayalı gerçek zamanlı kalman filtresi ile gerçekleştirilir [41]. Toposentrik anten koordinat sisteminde mevcut durumda izlenen uydular ve konumları, antenin en uygun eğimine ve yönelmesine karar vermek için kullanılır [41]. Yönelme istekleri robota iletilir. Robot her kalibrasyon için kalibrasyon işlemini sağlamakla beraber mevcut gözlemleri, anten kapsamını, gözlem süresini ve FMD doğruluğunu optimize eder. Robotun hata modeli takimetrik ölçüm sistemi ile sağlanan gözlemler kullanılarak geliştirilmiştir [37].

Bu yöntemle multipath ve FMD'nin birbirinden ayrılması, yüksek çözünürlüklü FMD elde edilmesi, referans anteninden bağımsız mutlak sonuçların elde edilmesi ve gerçek GNSS sinyallerinin kullanılması amaçlanmıştır.

Mutlak arazi kalibrasyonlarının avantajları şunlardır:

- GPS, GLONASS için gerçek zamanlı olarak L1, L2 mutlak FMD değerleri
- Referans anteninden ve referans koordinatlarından bağımsız
- Çok yolluluğun giderilmesi
- Referans noktası kesin olarak bilinen hassas robot
- Tüm anten yarıküresinin gözlemlerle tam kapsamı
- Otomatik ölçüm programı
- 0 derece yükseklik açısına kadar FMD
- Belirgin (anlamalı) azimuta bağlı FMD

Geo++ tarafından tüm anten türlerinin kalibrasyonu gerçekleştirilmemiştir. Bu nedenle bağıl FMO ve FMD değerlerinin mutlak değerlere dönüştürülmesi için takip eden eşitliklerde açıklanan yeni bir yöntem geliştirilmiştir [38]:

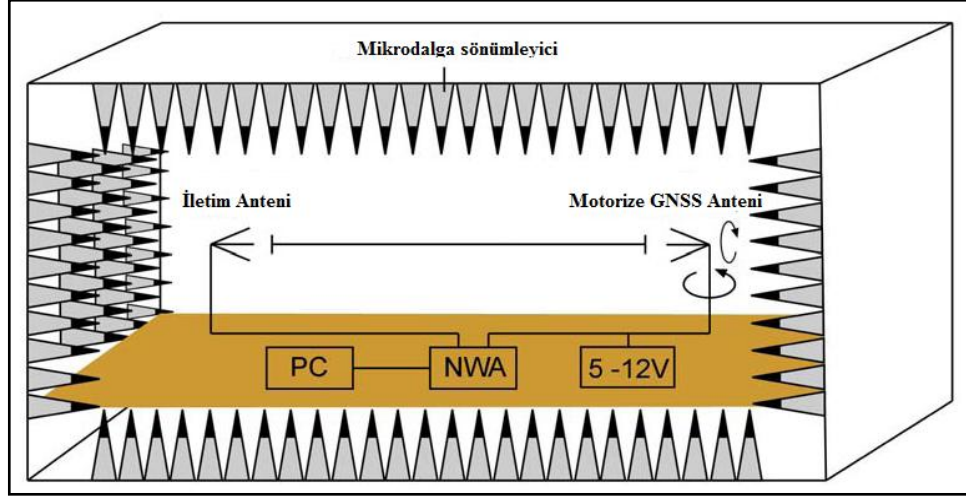
$$FMO_{mutlak} = FMO_{bağıl} + FMO_{mutlak(AOAD/M_T)} - FMO_{bağıl(AOAD/M_T)} \quad (5.2)$$

$$FMD_{mutlak} = FMD_{bağıl} + FMD_{mutlak(AOAD/M_T)} \quad (5.3)$$

Mutlak anten kalibrasyonlarını elde etmenin bir diğer yolu da ekosuz oda ölçümleridir. Laboratuvar anten kalibrasyon prosedüründe temel düşünce GNSS anteninin küçük yükseklik ve azimut açıları ile döndürülmesiyle farklı sinyal doğrultularını simüle etmektir [11]. Haliyle kalibrasyon düzeneği test bazının bir ucunda sabit bir ileticiden ve diğer ucunda test antenini taşıyan uzaktan kumandalı konumlayıcıdan oluşur [12]. Multipath etkilerinden kaçınmak amacıyla kalibrasyon ölçüleri ekosuz odada gerçekleştirilir. Duvarlardan yansımalara uğrayan test sinyallerinin etkileri özel sönümleyiciler kullanılarak minimize edilir.

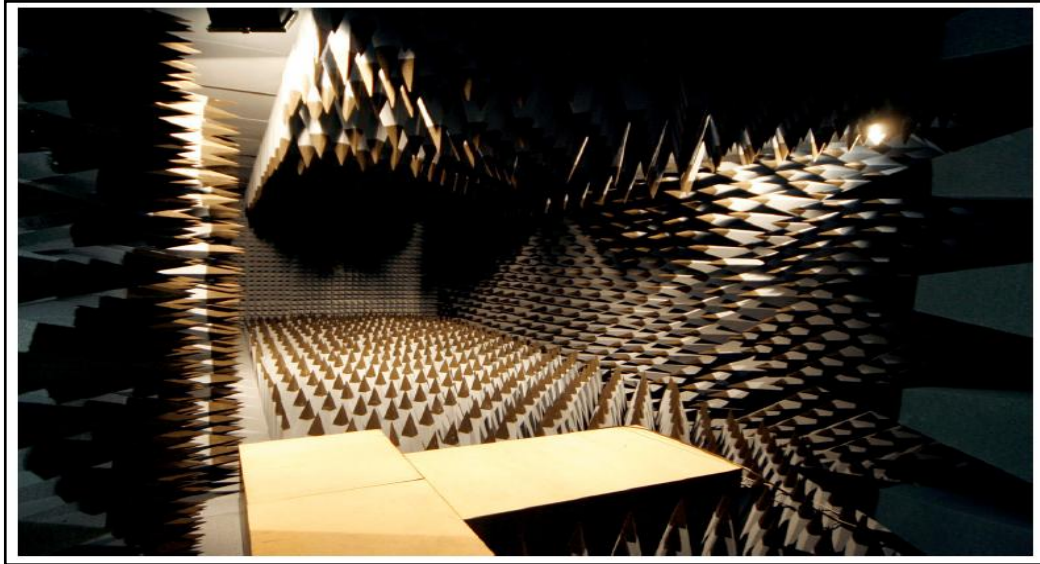
Kalibrasyon süresince düzeneğin temel bileşeni olan bir ağ analizörü (NWA) giden ve gelen sinyaller arasındaki faz kayıklığını ölçer. Bu faz gecikmesi sinyal doğrultusuna bağlıdır. Giden sinyal sabit olduğundan kalibrasyon sonucunda grid şeklinde doğrudan

faz düzeltmeleri elde edilir. Genellikle yalnızca GPS, GLONASS ve GALILEO frekanslarının analiz edildiği 1,15 GHz ile 1,60 GHz frekans aralığı kullanılır.



Şekil 5. 7 Ekosuz oda kalibrasyon ölçüm düzeneği

GNSS'e ilişkin olarak multipath ve anten yakın alanı etkileri en büyük hata kaynaklarıdır [42]. Kalibrasyon durumunda özel ekosuz odalar kullanılarak multipath etkileri çok büyük ölçüde indirgenebilirken yakın alan problemlerinden kaçınmak mümkün olmaz. Normal GNSS uygulamalarında antenin yakın çevresinin elektrik alana dolayısıyla da faz ölçümleri üzerine etkisi vardır.



Şekil 5. 8 Ekosuz oda (Bonn Üniversitesi)

Anten kalibrasyon işlemi yaklaşık olarak kırk dakika sürmekte ve antenin başlangıç yöneltmesi dışında tamamen otomatik olarak gerçekleşmektedir. Bu yöntemin bir dezavantajı karışık bir test kurulumunun olmasıdır. İlk olarak antenin etrafında döndüğü

noktanın koordinatları anten referans noktasına göre hassas olarak belirlenmelidir. İkinci olarak kullanılan kalibrasyon odası mikrodalga artık ışımasına karşı iyi korunmuş olmalıdır [33].

5.3 Matematiksel Modeller

Anten faz merkezi değişimlerinin belirlenmesinde ana hata kaynağı çok yolluluktur. Çok yolluluktan tamamen bağımsız bir ortam yoktur. Bundan dolayı özellikle arazi yöntemlerinden elde edilen anten faz modelleri çok yolluluk tarafından bozulur ve FMD değerlerinin doğruluğunun düşük olmasına neden olur. Bu yöntemde olay bir yıldız gününden sonra (23 saat, 56 dakika, 4,09 saniye) dünya etrafındaki GPS uydu diziliminin kendini tekrar etmesidir. Yıldız günü farklarının oluşturulmasıyla (birbirini takip eden iki yıldız günündeki gözlemlerin farkları) test anteninin çevresindeki geometriden kaynaklanan multipath hataları büyük ölçüde elimine edilir. Bu bir önceki güne göre yansıtıcı özelliklerin değişmemesi durumunda geçerlidir. Saat hataları ve atmosferik etkiler gibi diğer hata kaynakları yıldız günü farklarının ikili farkları alınarak elimine edilebilir [33], [43].

Aşağıda ilgili formüller ve değişkenler verilmektedir:

Faz sinyali için basitleştirilmiş bir doğrusallaştırılmış gözlem denklemi aşağıdaki gibidir:

$$l_{\Phi_i}^j = A_i^j \cdot x_i + c_o \cdot (dt_i - dT^j) - \lambda \cdot N_i^j - d_{ION_i}^j + d_{TROP_i}^j + d_{MPI}^j + d_{FMD_i}^j + \epsilon_{\Phi} \quad (5.4)$$

Yıldız günü farklarının oluşturulmasıyla hem multipath hem de faz merkezi değişimi hataları elimine edilir ve geometrik bilginin tamamı ifade edilir.

$$\delta^{SID} l_{\Phi_i}^j = c_o \cdot (\delta^{SID} dt_i - \delta^{SID} dT^j) - \lambda \cdot \delta^{SID} N_i^j - \delta^{SID} d_{ION_i}^j + \delta^{SID} d_{TROP_i}^j + \delta^{SID} \epsilon_{\Phi} \quad (5.5)$$

Bu farkların sırasıyla ikili farkları oluşturulur. Saat hataları ve atmosferik kırılmalar elimine edilir. Benzer biçimde tamsayı belirsizlikleri doğru olarak belirlenir.

$$\begin{aligned} \nabla \Delta \delta^{SID} l_{\Phi_{i,k}}^{j,l} &= -\lambda \cdot \nabla \Delta \delta^{SID} N_{i,k}^{j,l} + \nabla \Delta \delta^{SID} \epsilon_{\Phi} \\ \delta^{SID} l_{\Phi_i}^j &= c_o \cdot (\delta^{SID} dt_i - \delta^{SID} dT^j) - \lambda \cdot \delta^{SID} N_i^j - \delta^{SID} d_{ION_i}^j + \delta^{SID} d_{TROP_i}^j \\ &+ \delta_{FMD_i}^{\alpha_o, z_o, j} - \delta_{FMD_i}^{(\alpha_o + \Delta \alpha, z_o + \Delta z), j} + \delta^{SID} \epsilon_{\Phi} \\ \nabla \Delta \delta^{SID} l_{\Phi_{i,k}}^{j,l} &= -\lambda \cdot \nabla \Delta \delta^{SID} N_{i,k}^{j,l} + \nabla \Delta d_{FMD}^{(\alpha_o, z_o), (\alpha_o + \Delta \alpha, z_o + \Delta z), j, l} + \nabla \Delta \delta^{SID} \epsilon_{\Phi} \end{aligned} \quad (5.6)$$

Mutlak faz merkezi ötelemelerini ve faz merkezi değişimlerini belirlemek için kalibre edilecek anten iki ölçüm gününden birinde döndürülüp eğimlendirilirken diğerinde değiştirilmez. Bu ölçüm konfigürasyonunda faz merkezi değişimi, test edilen antenin döndürülmüş ve eğilmiş hali ile sabit tutulan hali arasındaki farklar yıldız zamanı farkı alınırken, gözlenen değişkenler olarak geri gelir $(\delta_{FMD\ i}^{\alpha_0, z_0\ j} - \delta_{FMD\ i}^{(\alpha_0 + \Delta\alpha, z_0 + \Delta z)\ j})$.

$$\delta^{SID} l_{\Phi i}^j = c_o \cdot (\delta^{SID} dt_i - \delta^{SID} dT^j) - \lambda \cdot \delta^{SID} N_i^j - \delta^{SID} d_{IONi}^j + \delta^{SID} d_{TROPi}^j + \delta_{FMD\ i}^{\alpha_0, z_0\ j} - \delta_{FMD\ i}^{(\alpha_0 + \Delta\alpha, z_0 + \Delta z)\ j} + \delta^{SID} \epsilon_{\Phi} \quad (5.7)$$

Burada $\nabla \Delta d_{FMD}$ terimi (antenin farklı yönelmelerinin farkları) antenin faz merkezinin değişimini tanımlar. İkinci anten önemli değildir, çünkü bunların yönelmeleri dolayısıyla da yönlendirmedeki farkları her iki gün içinde özdeştir. Bu nedenle faz merkezi değişimi farkları sıfıra eşittir. Bu durumda mutlak kalibrasyon parametreleri antenin iki farklı yönetime sahip olduğu durumda aynı uydulara yapılan gözlemlerin farkı alınarak hesaplanır.

$$\nabla \Delta \delta^{SID} l_{\Phi i, k}^{j, l} = -\lambda \cdot \nabla \Delta \delta^{SID} N_{i, k}^{j, l} + \nabla \Delta d_{FMD}^{(\alpha_0, z_0), (\alpha_0 + \Delta\alpha, z_0 + \Delta z)\ j, l} + \nabla \Delta \delta^{SID} \epsilon_{\Phi} \quad (5.8)$$

Ortalama faz merkezi ötelemeleri ve faz merkezi değişimlerinin değerleri burada aynı anda belirlenir. Matematiksel model olarak ötelemelerin birinci dereceden katsayılar olarak dahil edildiği küresel harmonikler kullanılır.

$$d_{FMD}(\alpha, z) = \sum_{n=0}^{n_{max}} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\alpha + B_{nm} \sin m\alpha) P_{nm}(\cos z) \quad (5.9)$$

Bu denklemde P_{nm} , normalleştirilmiş bütünleşik legendre fonksiyonunu ifade etmektedir.

A : Tasarım matrisinin alt vektörü

x : Kısaltılmış istasyon koordinatları

c_o : Işığın boşluktaki hızı(m/s)

dt : Alıcı saat hatası

dT : Uydu saat hatası

N : Tamsayı belirsizliği

λ : Dalga boyu (m)

d_{ION} : İyonosferik hata
 d_{TROP} : Troposferik hata
 d_{MP} : Çok yolluluk hatası
 d_{FMD} : Faz merkezi hatası
 ε_{Φ} : Faz gürültüsü
 δ^{SID} : Yıldız günü farkları
 $\nabla \Delta \delta^{\text{SID}}$: Yıldız günü ikili farkları

5.4 Kalibrasyon Dosya Formatları

Kullanılan yazılıma ya da kalibrasyon dosyalarını yayınlayan kurumlara bağlı olarak anten faz merkezi dosyaları farklı formatlara sahip olabilir. Bu dosya formatları aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- NGS / eski IGS formatı
- ANTEX formatı
- Geo ++ formatı
- FMO formatı
- Vektör formatı

5.4.1 NGS / Eski IGS Formatı

TPSCR3_GGD	CONE				Wal/Kalib-module WalANT				05.09.2005
-0.1	0.2				68.9				
7.9	7.3	6.1	5.1	4.3	3.1	1.3	-0.3	-1.3	-2.0
-2.7	-2.8	-2.0	-0.8	0.7	3.3	7.6	12.2	0.0	
-1.4	-0.3				97.5				
1.1	1.7	2.5	2.3	1.2	0.5	0.4	0.4	-0.2	-0.7
-0.7	-0.7	-0.9	-0.9	0.1	1.7	2.5	2.2	0.0	

Şekil 5. 9 NGS formatı

[vendor]	TPSCR3_GGD	CONE	Wa1/Kalib-module	Wa1ANT	05.09.2005
-0.1	0.2	68.9			
7.9	7.3	6.1	5.1	4.3	3.1
1.3	-0.3	-1.3	-2.0		
-2.7	-2.8	-2.0	-0.8	0.7	3.3
7.6	12.2	0.0			
-1.4	-0.3	97.5			
1.1	1.7	2.5	2.3	1.2	0.5
0.4	0.4	-0.2	-0.7		
-0.7	-0.7	-0.9	-0.9	0.1	1.7
2.5	2.2	0.0			

Şekil 5. 10 Eski IGS formatı

- NGS formatı 1.satır = Anten türü (20 karakter), diğer bilgiler
- Eski IGS formatı 1.satır = Üretici (15 karakter), anten tipi (20 karakter), diğer bilgiler
- 2.satır = L1 FMO (kuzey, doğu, yükseklik) mm
- 3.satır = L1 için 5⁰'lik adımlarla 90'dan 45'e milimetre cinsinden yükseklik açısına bağlı L1 FMD değerleri
- 4.satır = L1 için 5⁰'lik adımlarla 40'dan 0'a milimetre cinsinden yükseklik açısına bağlı L1 FMD değerleri
- 5.satır = L2 FMO (kuzey, doğu, yükseklik) mm
- 6.satır = L2 için 5⁰'lik adımlarla 90'dan 45'e milimetre cinsinden yükseklik açısına bağlı FMD değerleri
- 7.satır = L2 için 5⁰'lik adımlarla 40'dan 0'a milimetre cinsinden yükseklik açısına bağlı FMD değerleri

5.4.2 ANTEX Formatı

AOAD/M_T	NONE	START OF ANTENNA
ROBOT	Geo++ GmbH	TYPE / SERIAL NO
5.0	2	METH / BY / # / DATE
0.0	25-MAR-11	DAZI
90.0		ZEN1 / ZEN2 / DZEN
5.0		# OF FREQUENCIES
2		SINEX CODE
IGS08_1664		COMMENT
Number of Calibrated Antennas GPS:	002	COMMENT
Number of Individual Calibrations GPS:	062	START OF FREQUENCY
G01		NORTH / EAST / UP
0.58	-0.37	91.85

Şekil 5. 11 ANTEX formatı başlık bölümü

ANTEX formatı kalibrasyon yöntemi hakkında bilgi veren tek formattır. GLONASS ve GPS de dahil olmak üzere tüm FMO ve FMD türlerini destekler. Bir dosyaya birden çok

TPSCR3_GGD	CONE2170215							TYPE / SERIAL NO			
FIELD	LWa							1	05.11.2003METH / BY / # / DATE		
0.0									DAZI		
0.0	85.0	5.0							ZEN1 / ZEN2 / DZEN		
2									# OF FREQUENCIES		
01									START OF FREQUENCY		
-0.08	0.18	68.87							NORTH / EAST / UP		
NOAZI	7.92	7.33	6.11	5.11	4.30	3.05		1.32	-0.25	-1.28	
-2.04	-2.67	-2.76	-2.04	-0.85	0.68	3.30	7.59	12.15			
01									END OF FREQUENCY		
02									START OF FREQUENCY		
-1.41	-0.31	97.50							NORTH / EAST / UP		
NOAZI	1.09	1.65	2.49	2.32	1.25	0.47		0.41	0.35	-0.18	
-0.70	-0.73	-0.67	-0.93	-0.95	0.08	1.66	2.47	2.16			
02									END OF FREQUENCY		
								END OF ANTENNA			

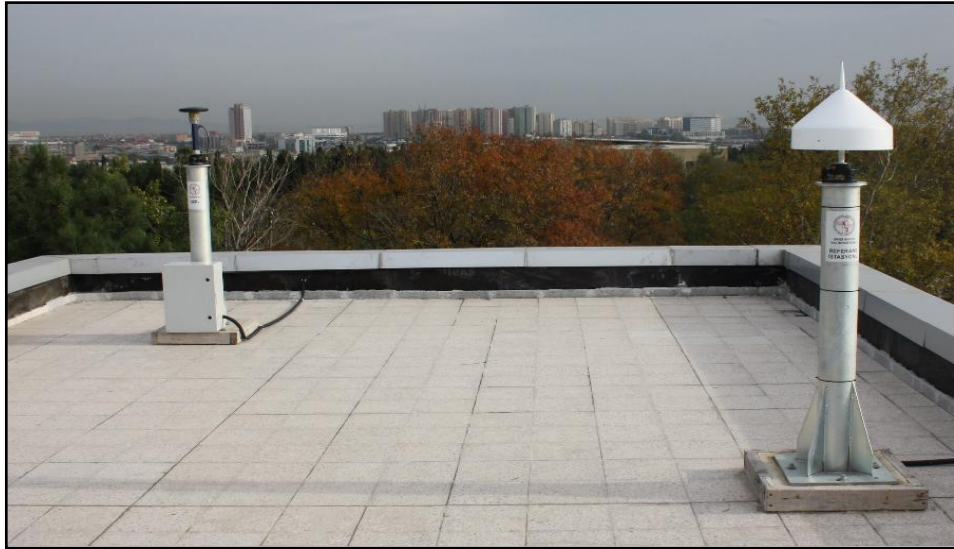
5.4.3 Geo++ Format

```
# (C) Geo++ GmbH
# www.geopp.de
#
# Antenna Phase Center Variations
#
# Antenna Type: AERAT1675_120 SPKE
# Antenna Serial Number: 5044
# Antenna Setup ID: 0
# Antenna Calibration Date: 2010-09-22 04:18:24
# Comments: Geo++
# GNSS: GPS
#
TYPE=AERAT1675_120 SPKE
NO OF FREQUENCIES=2
OFFSETS L1=-0.00001 0.00057 0.08051
OFFSETS L2=-0.00102 -0.00030 0.09653
ELEVATION INCREMENT=5
AZIMUTH INCREMENT=0
VARIATIONS L1=
-0.00828 -0.00491 -0.00186 0.00058 0.00231 0.00337 0.00387 0.00395 0.00375 0.00338 0.00292 0.00243 0.00194 0.00146 0.00101 0.00061 0.00028 0.00007 0.00000
VARIATIONS L2=
-0.01082 -0.00624 -0.00268 -0.00008 0.00180 0.00322 0.00431 0.00510 0.00555 0.00563 0.00533 0.00472 0.00389 0.00296 0.00203 0.00121 0.00056 0.00014 0.00000
STANDARD DEVIATIONS L1=
0.00014 0.00013 0.00012 0.00011 0.00011 0.00011 0.00011 0.00011 0.00010 0.00010 0.00010 0.00010 0.00010 0.00010 0.00009 0.00006 0.00004 0.00001 0.00000
STANDARD DEVIATIONS L2=
0.00016 0.00015 0.00013 0.00013 0.00012 0.00012 0.00012 0.00012 0.00011 0.00011 0.00011 0.00011 0.00011 0.00011 0.00010 0.00007 0.00004 0.00001 0.00000
```

65

UYGULAMA: ANTEN KALİBRASYONU

GNSS antenlerinin kalibrasyonunu konu alan yüksek lisans çalışması Yıldız Teknik Üniversitesi Harita Mühendisliği Bölümü'ne ait Ölçme Tekniği Laboratuvarı'nda mevcut olan THA800961+REC GPS antenlerinin faz merkezlerinin zamanla değişim gösterip göstermediğini araştırmak ve bu anten parametrelerinin bağıl kalibrasyon yöntemi ile belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanı Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi D Blok çatısına tesis edilen, koordinatları yersel ölçüler ve GPS ölçümleriyle hassas olarak belirlenen UZEL ve RFRN pilyeleridir. Bu iki pilyenin arasındaki baz kalibrasyon bazı olarak adlandırılmaktadır. Pilyeler arası yükseklik farkı hassas nivelman ile 1,857 cm olarak belirlenmiştir. Kalibrasyon bazı 5 m uzunluğundadır. Şekil 6.1'de gösterildiği üzere kalibrasyon pilyelerinin yakınına, alıcıları her türlü etkiye karşı muhafaza etmek amacıyla kutular yerleştirilmiştir. Bu kutuların içine kablo çekilerek prizler yerleştirilmiş ve elektrik bağlantısı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6. 1 Anten kalibrasyon bazı

Çevrede multipathe neden olacak yüzeylerin bulunmaması, anten ufkunun üzerinde herhangi bir engel bulunmaması, yakınlarda GNSS sinyallerini etkileyecek ve sinyal karışımına neden olacak tesisler bulunmaması nedeniyle kalibrasyon bazının yer seçiminde bina çatısı tercih edilmiştir.

Ölçüm ve yöntem olarak gerçekleştirilen işlem bağıl kalibrasyon işlemidir. Bağıl kalibrasyon işleminde ön koşul; kalibrasyonu gerçekleştirilmiş bir referans antenidir. Referans anteni olarak AeroAntenna Technology tarafından üretilen “AERAT1675_120 SPKE” anteni kullanılmıştır. Bu antenin mutlak kalibrasyonu Geo++ tarafından gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon raporu ve referans anteni Şekil (6.2) ve Şekil (6.3)’de gösterilmiştir.

Kalibrasyon uygulaması farklı seri numaralarına sahip iki THA800961+REC anteni için gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde aynı anten tipinin farklı seri numaralarının arasındaki uyum da araştırılmıştır. 2005429663 seri numaralı anten için 8 set, 2004468661 seri numaralı anten için 2 set veri toplanmıştır. GNSS uydu diziliminde kuzeyde uydu bulunmamaktadır. Buna kuzey boşluğu (northern hole) adı verilir. Antenin döndürülmesi ile bu kuzey boşluğunun faz merkezi modeline etkisi giderilir. Diğer bir deyişle, anten yarıküresinin tam kapsamı sağlanır.

GeoService®
Sachtlebenstraße 10, 42699 Solingen, Germany

Address S.A.S.
attn: Mr. Vincent Guehenens
ZAC de la Fleury BP60433
F-44474 Carquefou Cedex
Tel: +33 2 28 09 39 18

Your order: dated 09/09/2018
Email: August 18', 2018 11:56 AM, Wednesday

Please refer to your correspondence

Delivery note number	Date
LSW 09-09-106JDM775	September 29' 2018

Packing List

Pos.	Qty.	Description
1	1	Characteristics of Antenna Type
2	1	GNPCV Calibration Protocol
3	1	Geo++ Antenna Files on CD-ROM
4	1	Description of Geo++ Antenna Calibration
5	1	Format of Geo++ PCV Antenna File
6	1	Conditions for Antenna Calibration
7	1	AERAT1675_120 Antenna (return after calibration)
8	1	SPKE Radome (return after calibration)
9	1	Adapter CS090217
10	1	Cable A702455 ACRC 1012

Sincerely Yours
GeoService GmbH

L. de la Fleury
L. de la Fleury

Disposal: Mark AG (Name)
R&D 100 000 20
Antenn 100 000 20
Cable 100 000 20
Cable 100 000 20
GeoService
100 000 20
100 000 20
100 000 20
100 000 20

Page 1 of 1

Absolute Antenna Calibration
(Characteristics of Antenna Type)

Method
Geo++-GNPCV Real-Time Calibration

Antenna Data

Manufacturer	: AeroAntenna Technology, Inc.
Antenna Type	: AT1675, Choking Antenna
Product Number	: AT1675-120
IGS-Naming	: AERAT1675_120 SPKE

Radome Data

Manufacturer	: AeroAntenna Technology, Inc.
Radome Type	: conical dome with spike
Product Number	: AT5759005
IGS-Naming	: SPKE

Antenna Reference Point (ARP)

Horizontal Position	: rotation axis, center of 5/8" thread
Vertical Position	: bottom of antenna mount (BAM)

North Mark
mark on bottom side of antenna, labeled with "N", cable connector points south

Remarks

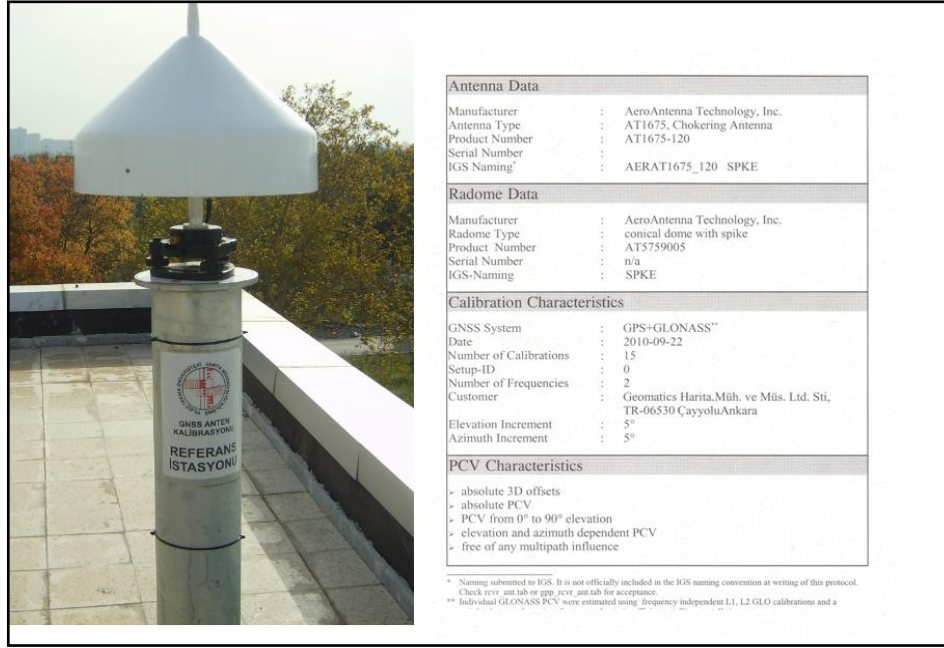





* Naming submitted to IGS. It is not officially included in the IGS naming convention at writing of this protocol.
Check your antenna at GPS_2011_01_01 for acceptance.

© Geo++-GNPCV/GeoService GmbH 10 2018-08-21

Şekil 6. 2 Referans antenin kalibrasyon raporu



Şekil 6. 3 Referans anteni (Ashtech AeroAntenna Technology)

Kalibrasyon raporu; kalibrasyonu gerçekleştirilen anten türünün özelliklerini, mutlak kalibrasyon özelliklerini, anten kalibrasyonunun gerçekleştirildiği koşulları, faz merkezi değişimi dosya formatı tanımlamasını ve faz merkezi değişimi değerlerini (ATX ve Geo++ formatında) içerir.

Kalibrasyon çalışmasında antenlerin döndürülmesi manuel gerçekleştirilmiştir. Bu işlem ucuz olmakla beraber oldukça zaman alıcıdır. Her bir kalibrasyon seti dört oturumdan oluşmaktadır ve her oturum 24 saat sürmektedir. 60 saniyelik veri kayıt aralığı kalibrasyon işlemi için yeterlidir. Mutlak kalibrasyonu gerçekleştirilmiş olan referans anteni sabit tutularak kalibrasyonu gerçekleştirilen anten sırasıyla kuzey, doğu, güney ve batı yönlerine yönlendirilerek 40 günlük ölçüm yapılarak 10 set kalibrasyon verisi elde edilmiştir. Her oturum için anten yüksekliği kumpas yardımıyla milimetrenin onda biri hassasiyetle ölçülmüştür. İlgili ölçüm bilgileri Çizelge (6.1)'de verilmiştir. Toplanan bu veri Dresden Teknik Üniversitesi'nden temin edilen Wa1/Kalib 2.0 yazılımı ile değerlendirilmiştir.



Şekil 6. 4 YTÜ Davutpaşa kalibrasyon istasyonları

Çizelge 6. 1 Ölçüm bilgileri

Ölçü No	Ölçü Tarihi	Alıcı Tipi	Alıcı Anten Tipi	Anten S/N
1	08.11.2010-12.11.2010	Z-MAX	THA800961+REC	2005429663
2	31.01.2011-04.02.2011	Z-MAX	THA800961+REC	2005429663
3	08.02.2011-12.02.2011	Z-MAX	THA800961+REC	2005429663
4	14.02.2011-18.02.2011	Z-MAX	THA800961+REC	2004468661
5	30.05.2011-03.06.2011	Z-MAX	THA800961+REC	2005429663
6	06.06.2011-10.06.2011	Z-MAX	THA800961+REC	2005429663
7	13.06.2011-12.02.2011	Z-MAX	THA800961+REC	2005429663
8	20.06.2011-24.06.2011	Z-MAX	THA800961+REC	2004468663
9	27.06.2011-01.07.2011	Z-MAX	THA800961+REC	2004468663
10	18.07.2011-22.07.2011	Z-MAX	THA800961+REC	2004468661

6.1 Wa1/Kalib 2.0 Yazılımı

Anten kalibrasyonu uygulaması amacıyla toplanan GNSS verilerinin değerlendirilmesinde Wa1/Kalib yazılımı kullanılmıştır. Wa1/Kalib yazılımı bağıl yöntemle ve kalibre edilecek antenin döndürülmesiyle gerçekleştirilen anten kalibrasyon gözlemlerinin değerlendirilmesinde kullanılan bir yazılımdır. Antenin döndürülme işlemi otomatik bir aygıtla ya da manuel olarak gerçekleştirilir. Her iki yaklaşım için en az iki anten yöneltmesine ihtiyaç duyulur. Dört yöneltme ile daha iyi sonuçlar elde edilir [44].

Program, Wa1 ve Wa1ANT olarak iki modülden oluşmaktadır. Diğer bir deyişle, verilerin değerlendirilmesi iki adımda gerçekleştirilir. Birinci adımda Wa1 yardımıyla referans istasyonu ile kalibre edilecek anten arasındaki baz vektörü değerlendirilir ve sonuç olarak tamsayı belirsizliği çözülmüş düzeltme denklemleri elde edilir. Wa1ANT ise Wa1 programı ile birlikte bağıl olarak kalibre edilecek antenin döndürülmesini de içeren GNSS anten kalibrasyon ölçümleri ile toplanan verilerin değerlendirilmesine

olarak sağlar. Sonuç olarak anten faz merkezi ötelemelerini (FMO) ve faz merkezi değişimlerini (FMD) içeren düzeltme değerleri elde edilir. Antenler elle döndürüldüğü için Wal ile dört farklı (oturum sayısı kadar) baz çözümü gerçekleştirilir.

```
rem *****
rem Data processing, first step:
rem *****

rem Ambiguity resolution and fixing in baseline
rem
rem Wal input options:
rem - elevation mask 0 deg (-e0)
rem - PZO+PZV of reference antenna to be corrected (+AC1Frefkal.atx)
rem - option +k prevents the file of processed observations
rem   (default file name wal.wal) from deletion
rem - the data processing protocol is stored in a file named
rem   file.log (+FLfile.log)
rem
rem output files:
rem - file.log:   protocol of baseline processing
rem - walsol.txt: solution file; can be ignored
rem - file.wal:   files of processed observations; input files for
rem               second processing step

wal RFRN3121.10o UZEL3121.10o -e0 +AC1Frefz.atx +knord.wal +FLnord.log +FSnord.sol
wal RFRN3131.10o UZEL3131.10o -e0 +AC1Frefz.atx +kost.wal  +FLost.log  +FSost.sol
wal RFRN3141.10o UZEL3141.10o -e0 +AC1Frefz.atx +ksued.wal +FLsued.log +FSsued.sol
wal RFRN3151.10o UZEL3151.10o -e0 +AC1Frefz.atx +kwest.wal +FLwest.log +FSwest.sol
```

Şekil 6. 5 Wal program girdileri

Wal ve WalANT GPS verilerini değerlendirebildiği gibi GLONASS gözlemlerini de değerlendirebilir. Çift frekanslı GPS/GLONASS kalibrasyon sonuçları dört frekans için anten düzeltmelerini içerir: GPS L1 ve L2, GLONASS L1 ve L2.

Bağıl anten kalibrasyonunun ön koşulu mutlak yöntemle kalibre edilmiş bir referans antenidir. Bu antenin anten düzeltme değerleri Wal programına tanıtılmalıdır. GPS/GLONASS kalibrasyonu durumunda referans antenin anten düzeltmeleri GPS ve GLONASS frekanslarını içermelidir. Referans antenin kalibrasyon değerleri için ANTEX formatının kullanılması tavsiye edilir. Wal aynı zamanda eski IGS formatına neredeyse özdeş olan NGS formatını da tanır. Fakat bu formatın yalnızca yüksekliğe bağlı değişimleri içermesi, azimuta bağlı değişimlerin ve GLONASS frekansları için değişimlerin mevcut olmamasından dolayı bilgi içeriği eksiktir. Wal, Geo++ formatını desteklememektedir.

İki antenin anten referans noktaları arasındaki yükseklik farkı hassas nivelman ile milimetre altı doğrulukla belirlenmelidir. Antenin elle döndürülmesi durumunda oturumların yükseklik farklarının birbirine özdeş olması gerekmektedir. Referans antenine tüm kalibrasyon işlemi süresince dokunulmamalıdır.

Gözlemler çok düşük uydu yükseklik açıları ile gerçekleştirilir (0 derece). Ortalama faz merkezi ötelemesi 10 veya 15 derecelik uydu yükseklik açıları için hesaplanır fakat daha düşük açılı uydulara yapılan gözlemler yüksekliğe bağlı FMD değerlerinin daha iyi sonuçlar vermesini sağlar.

```
rem *****
rem Data processing, second step:
rem *****

rem All WalANT runs require input of (sub-)millimeter accurate height
rem difference between ARPs of reference antenna and antenna to be
rem calibrated. In this example the difference amounts to -0.0707 m.
rem Sign convention: Delta_Height = height of antenna to be calibrated
rem - height of reference antenna.
rem
rem WalANT input parameters and options:
rem   - parameter: ARP height difference
rem   - 4 times "A:file.wal" for 4 different orientations
rem   - option +r: robust estimation
rem   - azi.-ele. PZV by default
rem   - no corrections below an elevation mask of 4 deg by default
rem   - output in ANTEX format by default
rem
rem output files:
rem   - out (to standard output)
rem   - UZEL.rpt - report file
rem   - UZEL.atx - calibration results in ANTEX format

walant -0.0687 0:nord.wal 90:ost.wal 180:sued.wal 270:west.wal +r >out
```

Şekil 6. 6 Wa1ANT program girdileri

Verilerin değerlendirilebilmesi için çalışma klasörü gerekli olan tüm dosyaları içermelidir. Bu verileri şu şekilde sıralanır:

- Dört oturuma ait referans antenin RINEX formatında gözlem dosyaları
- Dört oturuma ait kalibre edilecek antenin RINEX formatında gözlem dosyaları
- RINEX formatında navigasyon dosyası (Yayın efemerisi)
- Referans anteni için ANTEX formatında FMO ve FMD düzeltmeleri

6.2 Değerlendirmeler

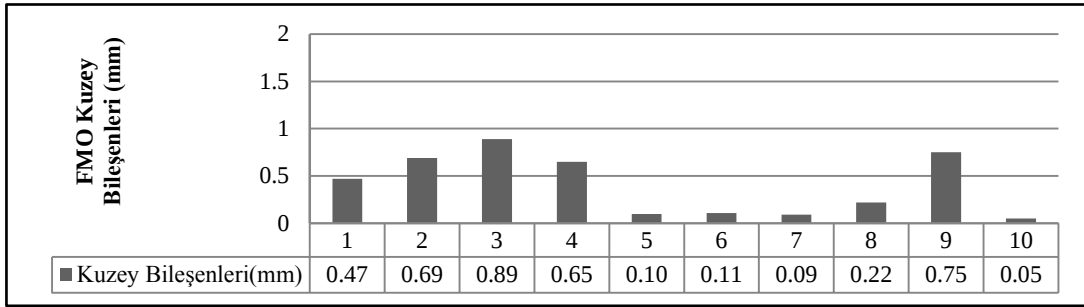
Anten kalibrasyonu çalışması anten parametrelerinin belirlenmesi ve belirlenen bu parametrelerin karşılaştırılması işlemlerini içermektedir.

- Wa1/Kalib ile değerlendirmeler
- CCANTEX/CCANT ile değerlendirmeler

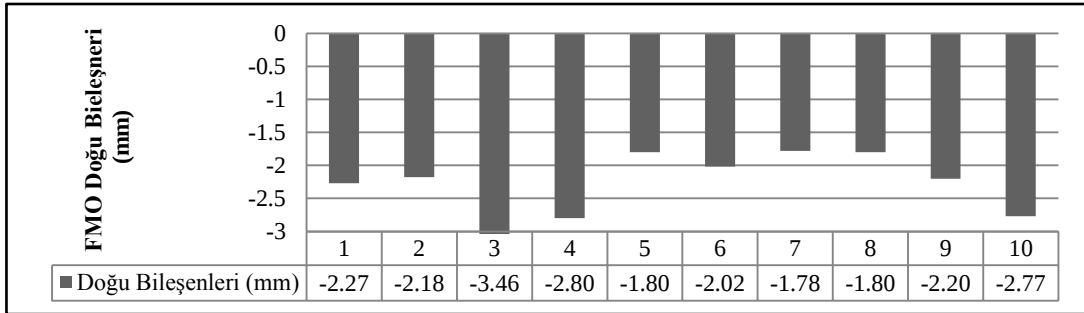
6.2.1 Wa1/Kalib İle Değerlendirmeler

Bu bölümde Wa1ANT ile elde edilen sonuçlar sunulmuştur. L1 ve L2 için ayrı ayrı faz merkezi ötelemeleri, yükseklik açısına bağlı faz merkezi değişimleri, azimut ve yükseklik açısına bağlı faz merkezi değişimleri elde edilmiş ve grafik olarak gösterilmiştir. 10 set için Wa1 baz çözümlerine ilişkin sonuçlar EK-A' da gösterilmiştir

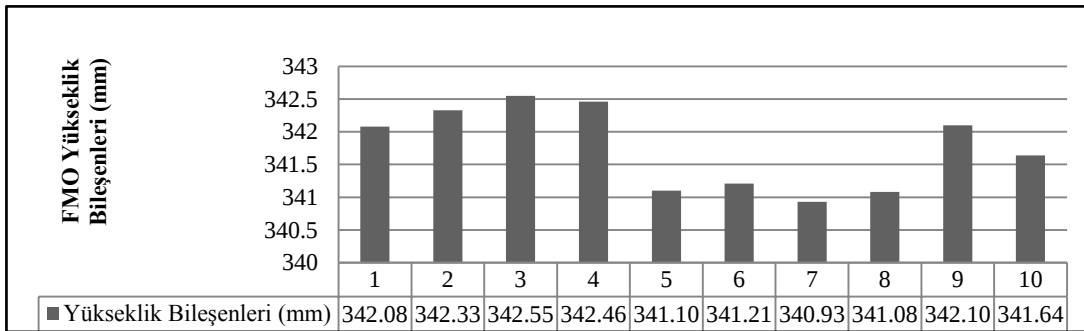
6.2.1.1 Faz Merkezi Ötelemesi Bileşenleri



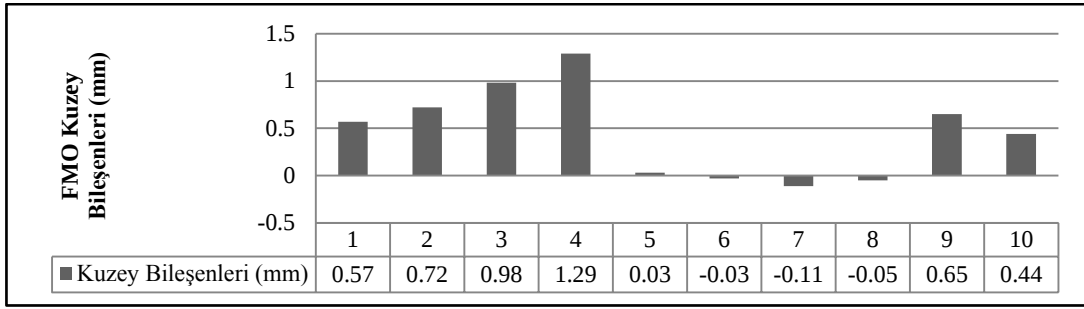
Şekil 6. 7 FMO L1 kuzey bileşenleri



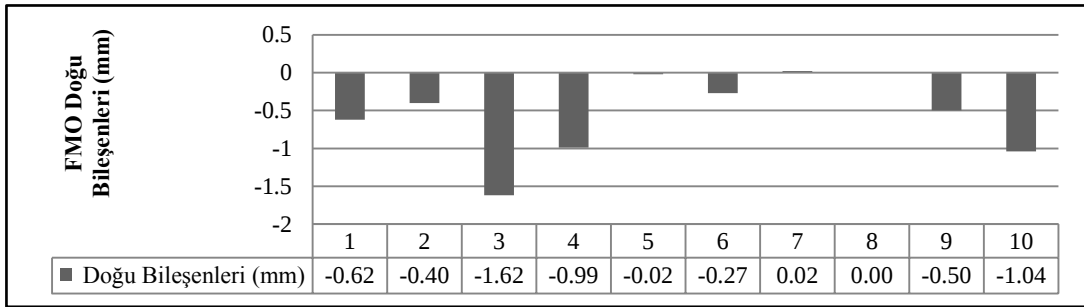
Şekil 6. 8 FMO L1 doğu bileşenleri



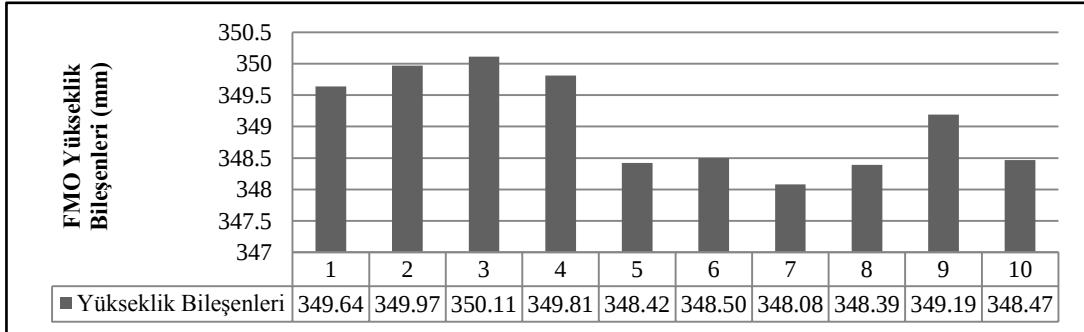
Şekil 6. 9 FMO L1 yükseklik bileşenleri



Şekil 6. 10 FMO L2 kuzey bileşenleri



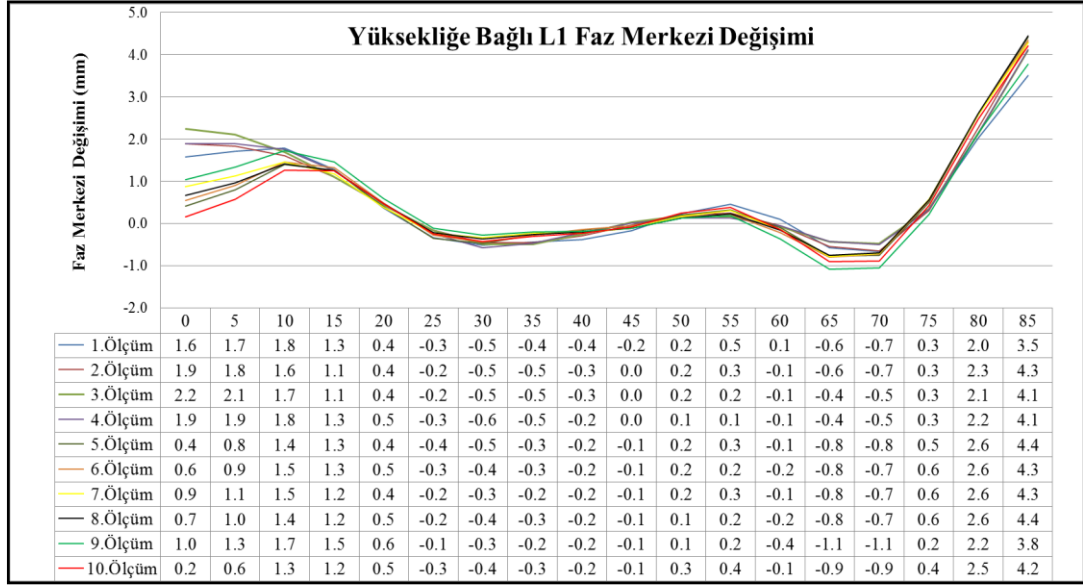
Şekil 6. 11 FMO L2 doğu bileşenleri



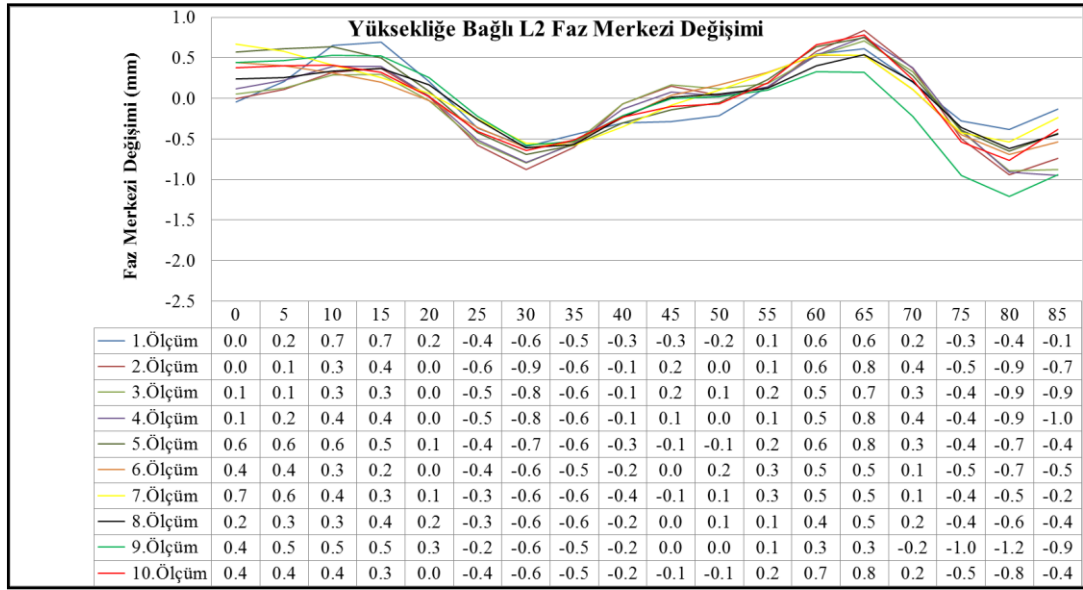
Şekil 6. 12 FMO L2 yükseklik bileşenleri

6.2.1.2 Yükseklik Açısına Bağlı Faz Merkezi Değişimleri

Wa1ANT program ile elde edilen ATX dosyalarının NOAZI ile başlayan satır elemanları yükseklik açısına bağlı faz merkezi değişimlerini belirtir. L1 ve L2 için 10 seti de içerecek şekilde grafikler oluşturulmuştur.



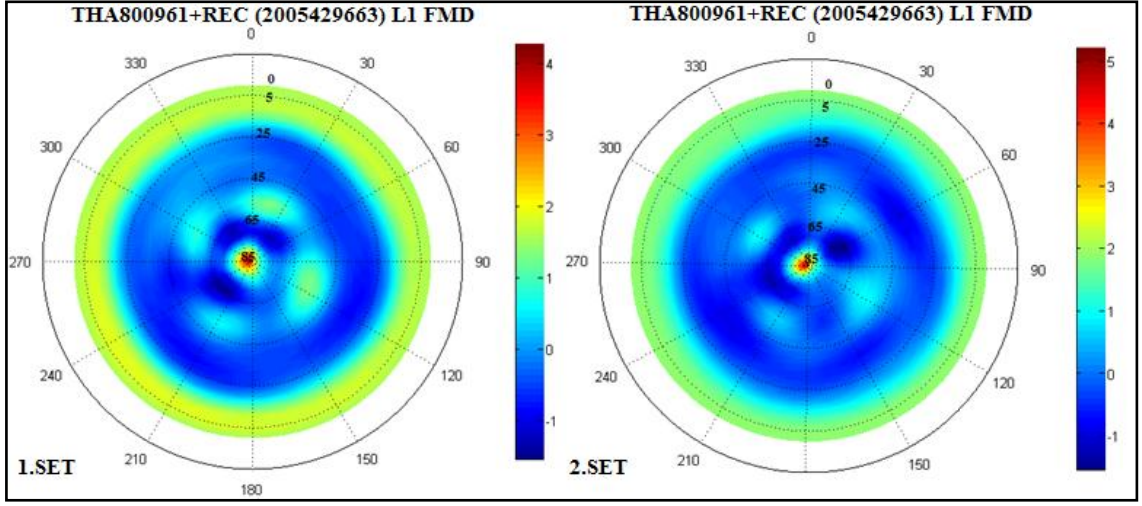
Şekil 6. 13 Yükseklik açısına bağlı L1 faz merkezi değişimi



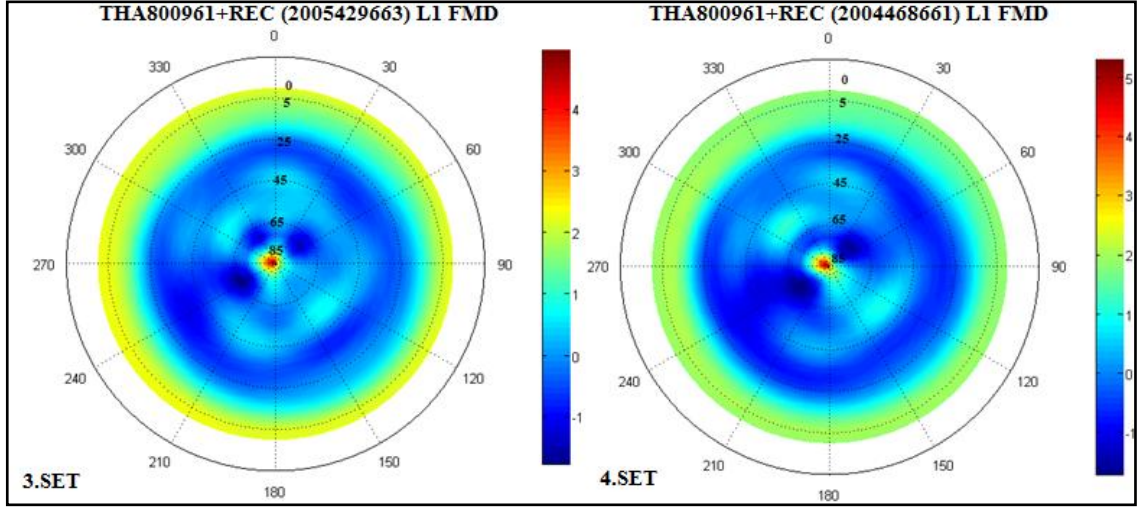
Şekil 6. 14 Yükseklik açısına bağlı L2 faz merkezi değişimi

6.2.1.3 Yükseklik ve Azimut Açısına Bağlı Faz Merkezi Değişimleri

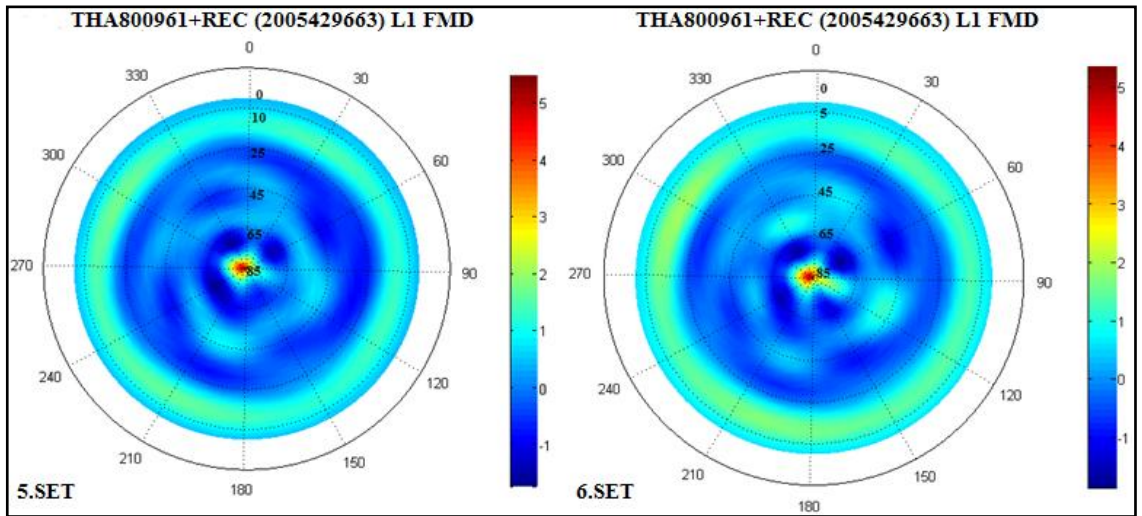
5 derecelik artımlarla 0'dan 90'a yükseklik açılarına ve 0'dan 360'a azimut açılarına ilişkin faz merkezi değişimlerinin beraber gösterildiği modeldir. Antene yukarıdan bakıldığında faz merkezi değişimlerinin sahip olduğu model olarak da düşünülebilir. FMD' ye ilişkin bu polar grafiklerin çizimi MATLAB aracılığıyla gerçekleştirilmiştir.



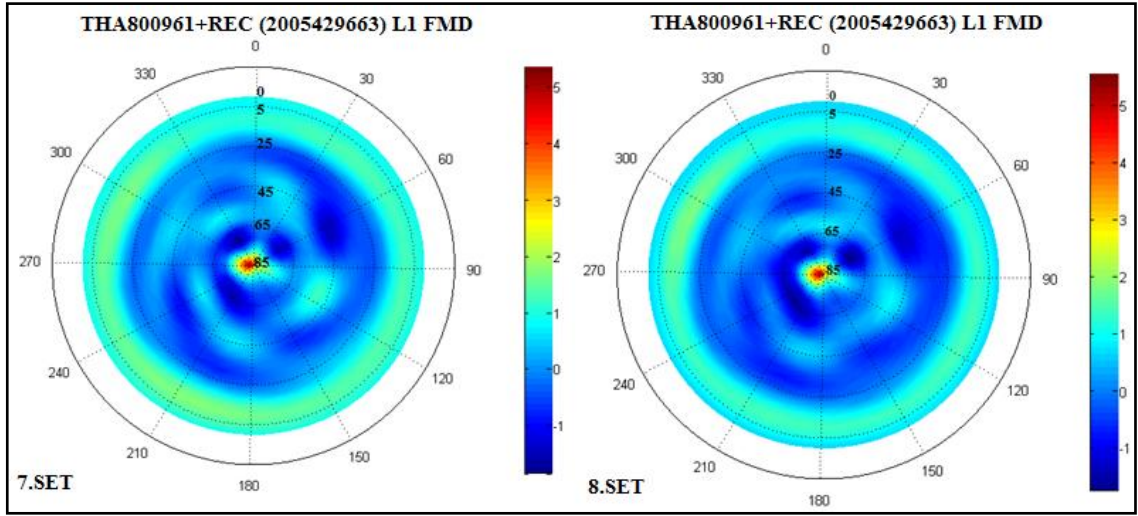
Şekil 6. 15 Azimut ve yükseklik açısına bağlı 1. ve 2. Set FMD grafikleri



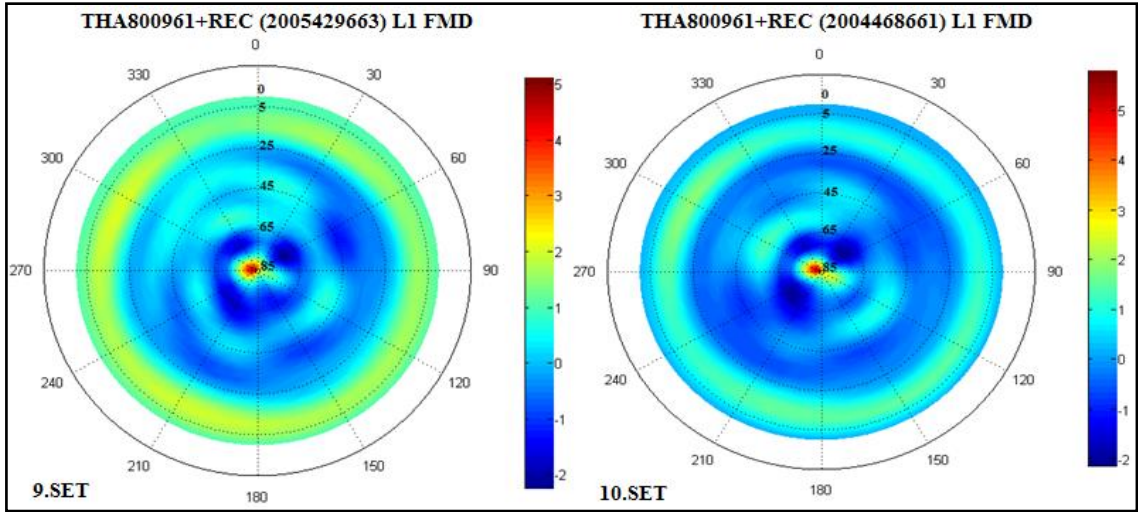
Şekil 6. 16 Azimut ve yükseklik açısına bağlı 3. ve 4. Set FMD grafikleri



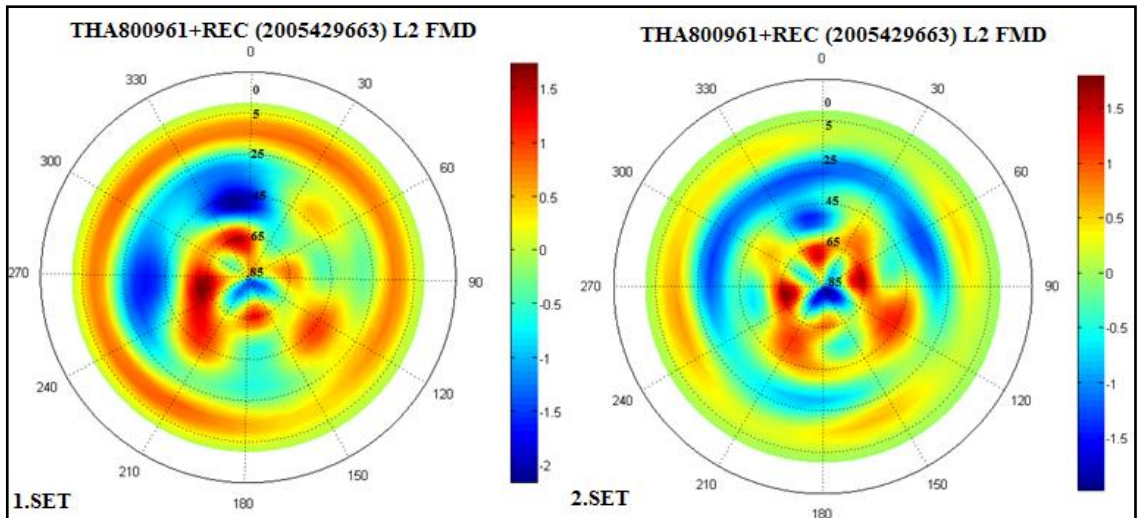
Şekil 6. 17 Azimut ve yükseklik açısına bağlı 5. ve 6. Set FMD grafikleri



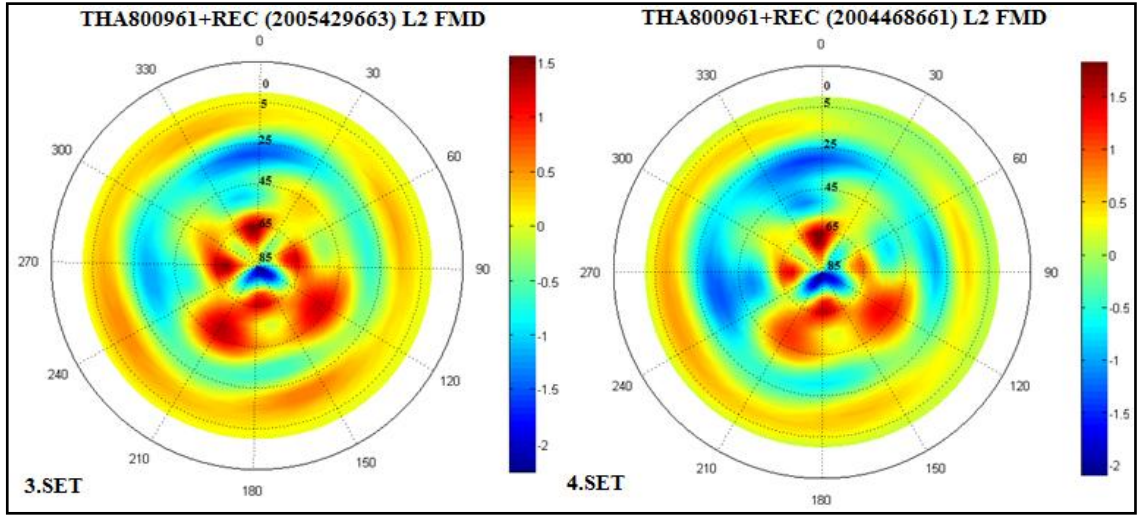
Şekil 6. 18 Azimut ve yükseklik açısına bağlı 7. ve 8. Set FMD grafikleri



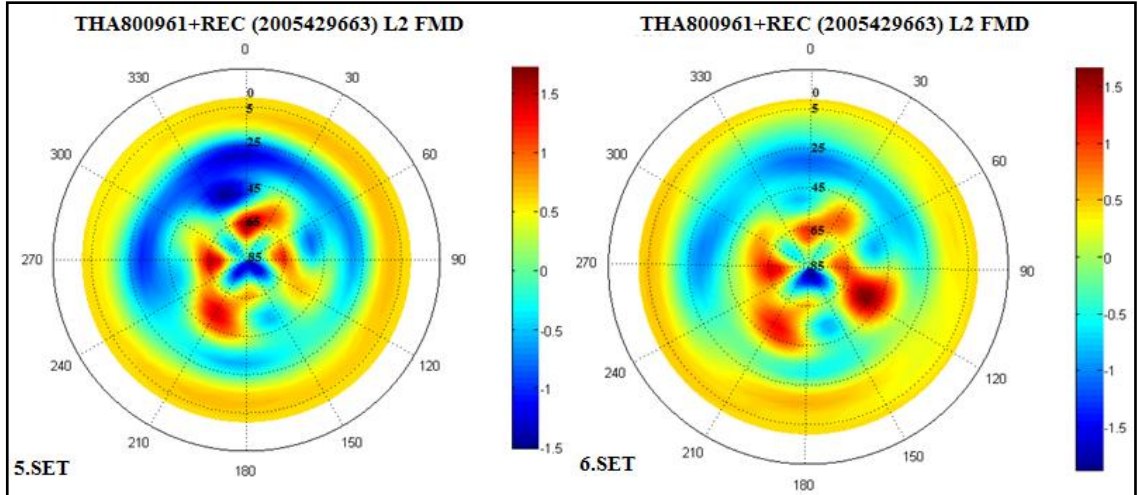
Şekil 6. 19 Azimut ve yükseklik açısına bağlı 9. ve 10. Set FMD grafikleri



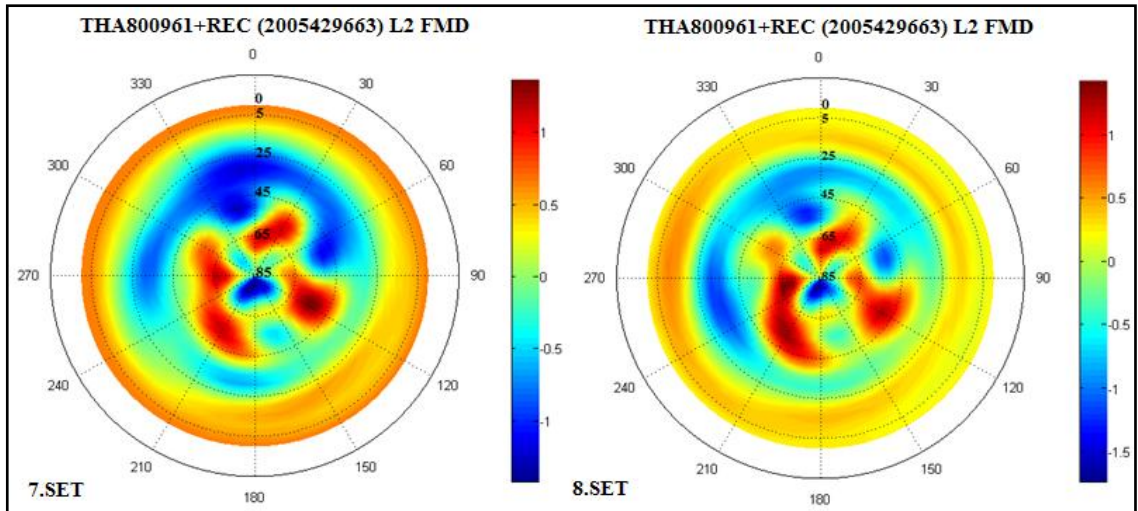
Şekil 6. 20 Azimut ve yükseklik açısına bağlı 1. ve 2. Set FMD grafikleri



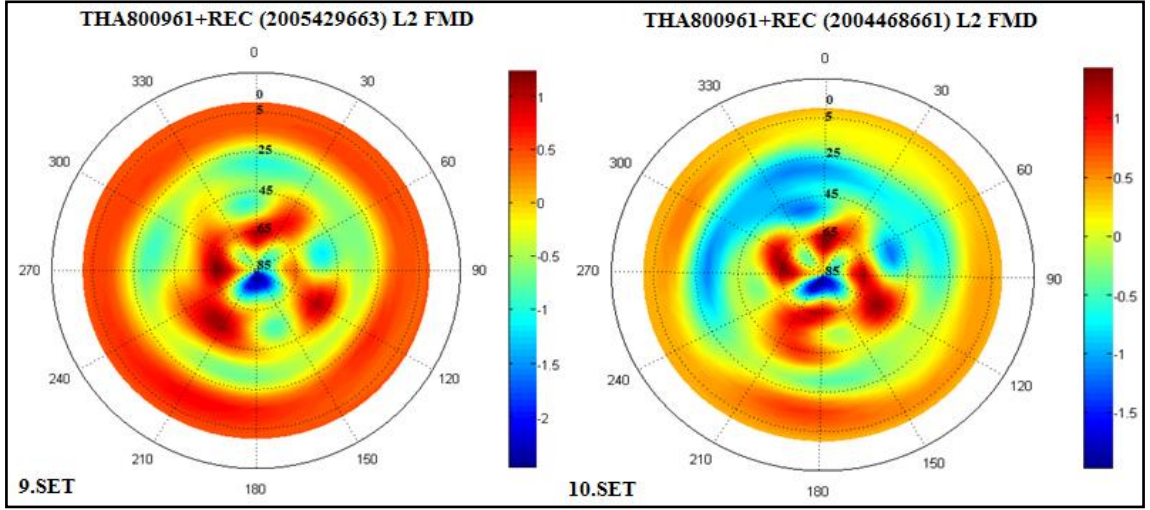
Şekil 6. 21 Azimut ve yükseklik açısına bağlı 3. ve 4. Set FMD grafikleri



Şekil 6. 22 Azimut ve yükseklik açısına bağlı 5. ve 6. Set FMD grafikleri



Şekil 6. 23 Azimut ve yükseklik açısına bağlı 7. ve 8. Set FMD grafikleri



Şekil 6. 24 Azimut ve yükseklik açısına bağlı 9. ve 10. Set FMD grafikleri

6.2.2 CCANTEX/CCANT İle Değerlendirme

CCANTEX programı; elde edilen kalibrasyon parametrelerinin NGS kalibrasyon verileri ile mukayesesine, elde edilen kalibrasyon dosyalarının birleştirilmesine ve kalibrasyon dosyalarının birbirleri ile karşılaştırılmasına olanak sağlar. Anten kalibrasyon çalışmasında kullanılan THA800961+REC anteninin NGS formatındaki kalibrasyon dosyasının CCANTEX programında kullanılacak ATX formatına dönüşümü ise CCANT modülü ile sağlanır. Değerlendirmelerin gerçekleştirildiği tarihte NGS websitesinde, kullanılan Thales anteni için ATX formatında kalibrasyon dosyası bulunmamaktaydı. APC uzantılı NGS/eski IGS formatındaki kalibrasyon dosyası CCANT modülü ile ATX formatına dönüştürülmüştür. Ancak ITRF08'in gerçekleşimiyle beraber anten kalibrasyon değerleri de güncellenmiştir ve NGS08.ATX dosyası NGS web sitesinde yayınlanmıştır. CCANTEX ile yapılan değerlendirmeler şu şekildedir:

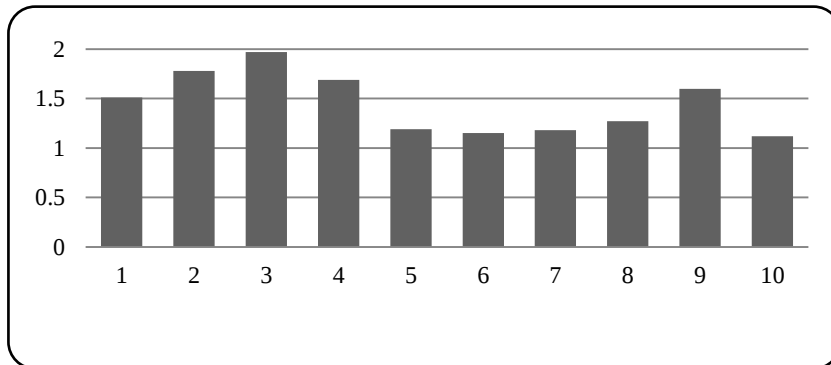
- Wa1ANT ile elde edilen ANTEX dosyalarının NGS değerleri ile karşılaştırılması
- Wa1ANT ile elde edilen ANTEX dosyalarının kombinasyonları
- Wa1ANT ile elde edilen ANTEX dosyalarının birbirleri ile karşılaştırılması

6.2.2.1 Sonuçların NGS Değerleri ile Karşılaştırılması

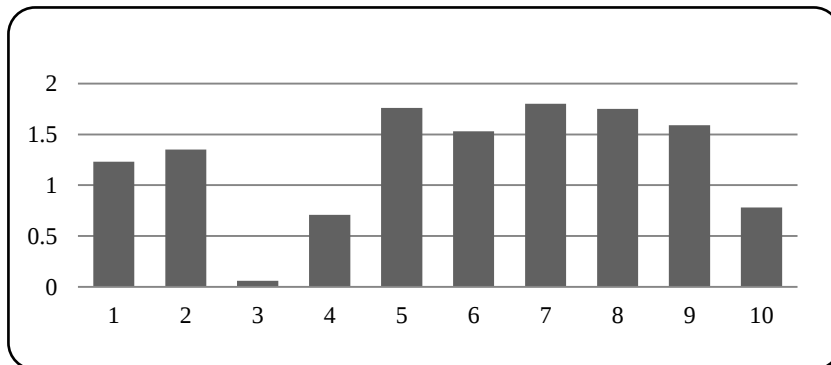
CCANTEX/CCANT programı iki kalibrasyon veri setinin karşılaştırılmasında şu aşamaları izler:

- FMO değerleri FMD değerlerinin hesabına ilave edilir. Devamında $FMO = 0$ olur.
- FMD farkları hesaplanır.
- FMO değerleri bu farklardan yeniden hesaplanır ve FMD'ye olan etkileri giderilir.
- Sonuç olarak FMO ve FMD farkları elde edilir.

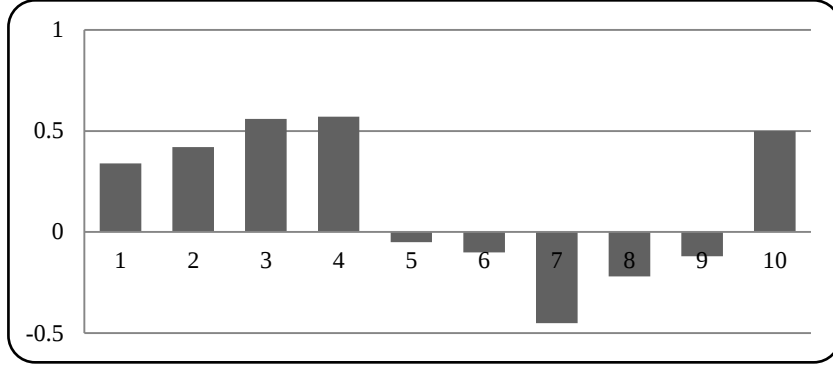
FMD değerleri grid şeklindedir ve bu grid değerleri mesafe ölçümü olarak kabul edilir. Her bir frekans için üç FMO bileşeni bu doğrultuda dengelenir. Diğer bir deyişle bu üç FMO bileşeni çeşitli azimut ve yükseklik açıları altında mesafe ölçümlerinden elde edilen konum biçiminde belirlenir. Devamında FMD değerleri elde edilen bu FMO değerlerine göre düzeltilir.



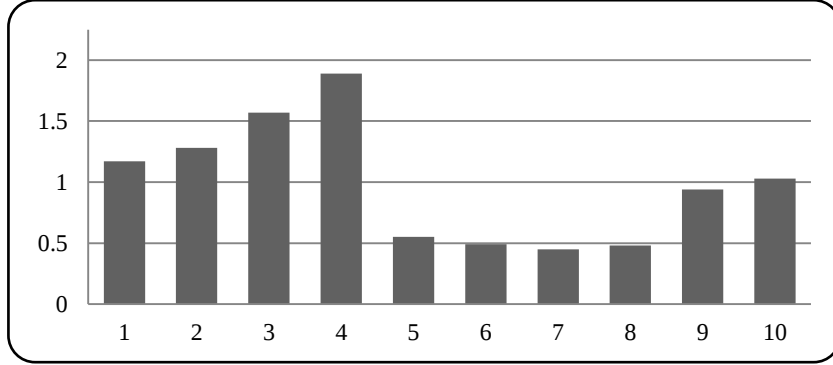
Şekil 6. 25 NGS karşılaştırması L1 kuzey bileşeni (mm)



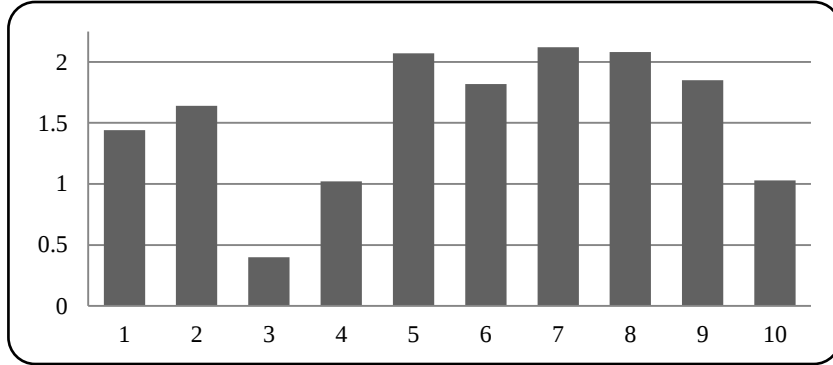
Şekil 6. 26 NGS karşılaştırması L1 doğu bileşeni (mm)



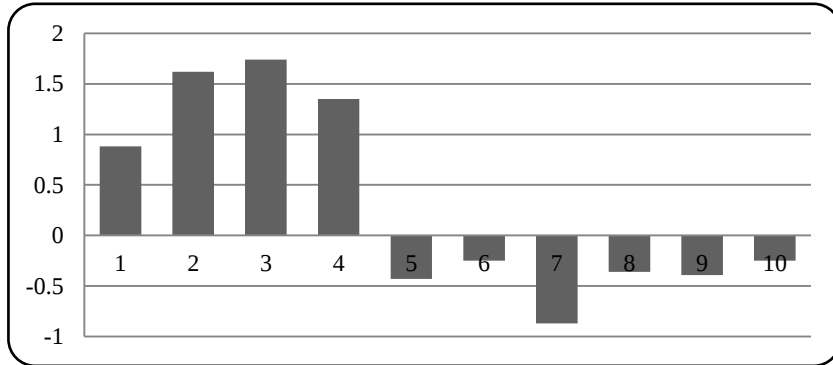
Şekil 6. 27 NGS karşılaştırması L1 yükseklik bileşeni (mm)



Şekil 6. 28 NGS karşılaştırması L2 kuzey bileşeni (mm)



Şekil 6. 29 NGS karşılaştırması L2 doğu bileşeni (mm)



Şekil 6. 30 NGS karşılaştırması L2 yükseklik bileşeni (mm)

Çizelge 6. 2 FMO bileşenleri için NGS karşılaştırma sonuçları

	FMO Farkları			
	FMO	Kuzey (mm)	Doğu (mm)	Yükseklik (mm)
1.Set	L1	1,51	1,23	0,34
	L2	1,17	1,44	0,88
2.Set	L1	1,78	1,35	0,42
	L2	1,28	1,64	1,62
3.Set	L1	1,97	0,06	0,56
	L2	1,57	0,40	1,74
4.Set	L1	1,69	0,71	0,57
	L2	1,89	1,02	1,35
5.Set	L1	1,19	1,76	-0,05
	L2	0,55	2,07	-0,43
6.Set	L1	1,15	1,53	-0,10
	L2	0,49	1,82	-0,25
7.Set	L1	1,18	1,80	-0,45
	L2	0,45	2,12	-0,87
8.Set	L1	1,27	1,75	-0,22
	L2	0,48	2,08	-0,36
9.Set	L1	1,60	1,59	-0,12
	L2	0,94	1,85	-0,39
10.Set	L1	1,12	0,78	0,50
	L2	1,03	1,03	-0,25

Buradaki değerler, faz merkezi ötelemesi değerlerinin 15 derece uydu yükseklik açısı için yeniden belirlenerek, NGS değerleri ile farkları alınarak elde edilmiştir.

6.2.2.2 Sonuç Dosyalarının Birleştirilmesi

Wa1ANT programı ile elde edilen ANTEX dosyalarından tek bir ANTEX dosyası elde etmek mümkündür. Dosyalar CCANTEX programı kullanılarak birleştirilebilir. Dosyaların birleştirilmesinde çeşitli varyasyonlar denenmiş ve sonuçlar sunulmuştur. Bu varyasyonlardan ilki birleştirilecek ölçü setleridir. Daha önce de belirtildiği üzere çalışmada iki farklı seri numarasına sahip THALES anteni kullanılmış ve tekrarlı ölçüler farklı mevsimlerde gerçekleştirilmiştir. Bu varyasyonlar şu şekildedir:

- 2005429663 seri numaralı THA800961+REC antenine ilişkin ilk üç setin kombinasyonu (kış mevsiminde birbirini izleyen üç set)
- 2005429663 seri numaralı THA800961+REC antenine ilişkin son beş setin kombinasyonu (yaz mevsiminde birbirini izleyen beş set)
- 2005429663 seri numaralı THA800961+REC antenine ilişkin tüm setlerin kombinasyonu
- 2004468661 seri numaralı THA800961+REC antenine ilişkin iki setin kombinasyonu
- Tüm kalibrasyon setlerinin kombinasyonu
- Wa1ANT ile elde edilen ANTEX dosyalarının birleştirilmesinde yükseklik açısının 0° derece seçilmesi
- Wa1ANT ile elde edilen ANTEX dosyalarının birleştirilmesinde yükseklik açısının 10° seçilmesi

Sonuçlar daha önceki bölümlerde olduğu biçimde faz merkezi ötelemeleri, faz merkezi değişimleri grafiği şeklinde verilmiştir. Yine benzer biçimde kombinasyonların NGS ile mukayeseleri gerçekleştirilmiştir. ANTEX dosyalarının birleştirilmesi ile elde edilen parametrelerinin karesel ortalama hataları (KOH) ve ortalama değerden olan farkları elde edilmiştir ve tekrarlılıkların gözlenmesine farklı bir bakış açısı getirilmiştir. Wa1ANT programı ile gerçekleştirilen değerlendirmelerde yükseklik açısı 0° olarak seçilmiştir. Bu nedenle birleştirme işleminde bu dosyaların doğrudan tanıtılması yeterlidir. Diğer bir seçenek olarak -E10 komutu kullanılarak CCANTEX ile birleştirme işlemi 10° yükseklik açısı için gerçekleştirilir. Birleştirme işlemi ile elde edilen ANTEX dosyalarının NGS ile mukayesesinde uydu yükseklik açısı 10° olarak seçilmiştir.

Çizelge 6. 3 Kombinasyonlara ilişkin FMO değerleri (yükseklik açısı 0°)

FMO Değerleri	L1 (mm)			L2 (mm)		
	Kuzey	Doğu	Yükseklik	Kuzey	Doğu	Yükseklik
İlk 3 Set (2005429663)	0,65	-2,72	340,33	0,94	-0,94	350,20
Son 5 Set (2005429663)	0,18	-1,92	339,71	0,18	-0,11	348,33
Tüm Setler (2005429663)	0,36	-2,22	339,94	0,47	-0,42	349,03
Tüm Setler (2004468661)	0,30	-2,85	340,43	1,06	-1,08	349,34
Tüm Setler (2005429663 ve 2004468661)	0,35	-2,34	340,04	0,59	-0,55	349,10

Çizelge 6. 4 Kombinasyonlara ilişkin FMO değerleri (yükseklik açısı 10°)

FMO Değerleri	L1 (mm)			L2 (mm)		
	Kuzey	Doğu	Yükseklik	Kuzey	Doğu	Yükseklik
İlk 3 Set (2005429663)	0,61	-2,55	341,60	0,78	-0,88	349,80
Son 5 Set (2005429663)	0,13	-1,76	341,09	0,07	-0,09	348,03
Tüm Setler (2005429663)	0,31	-2,06	341,28	0,34	-0,39	348,69
Tüm Setler (2004468661)	0,27	-2,68	341,73	0,89	-1,02	348,91
Tüm Setler (2005429663 ve 2004468661)	0,30	-2,18	341,37	0,45	-0,51	348,74

Çizelge 6. 5 Kombinasyonların NGS ile karşılaştırılması (yükseklik açısı 0°)

FMO Farkları	L1 (mm)			L2 (mm)		
	Kuzey	Doğu	Yükseklik	Kuzey	Doğu	Yükseklik
İlk 3 Set (2005429663)	1,71	1,05	0,14	1,19	1,22	1,30
Son 5 Set (2005429663)	1,23	1,84	-0,37	0,47	2,01	-0,47
Tüm Setler (2005429663)	1,41	1,54	-0,18	0,74	1,72	0,19
Tüm Setler (2004468661)	1,37	0,92	0,27	1,29	1,08	0,41
Tüm Setler (2005429663 ve 2004468661)	1,40	1,42	-0,09	0,85	1,59	0,24

Çizelge 6. 6 Kombinasyonların NGS ile karşılaştırılması (yükseklik açısı 10°)

FMO Farkları	L1 (mm)			L2 (mm)		
	Kuzey	Doğu	Yükseklik	Kuzey	Doğu	Yükseklik
İlk 3 Set (2005429663)	1,71	1,05	0,14	1,18	1,22	1,30
Son 5 Set (2005429663)	1,23	1,84	-0,37	0,47	2,01	-0,47
Tüm Setler (2005429663)	1,41	1,54	-0,18	0,74	1,71	0,19
Tüm Setler (2004468661)	1,37	0,92	0,27	1,29	1,08	0,41
Tüm Setler (2005429663 ve 2004468661)	1,40	1,42	-0,09	0,85	1,59	0,24

Çizelge 6. 7 (2005429663) seri numaralı antenin ilk üç set kombinasyonunun ortalama AFM'den farkları

Yükseklik Açısı 0°	L1 (mm)				L2 (mm)			
	FMO Kuzey	FMO Doğu	FMO Yük.	FMD KOH	FMO Kuzey	FMO Doğu	FMO Yük.	FMD KOH
1.Set	-0,24	0,35	-0,10	0,24	-0,17	0,28	-0,53	0,36
2.Set	0,03	0,47	-0,02	0,18	-0,06	0,48	0,2	0,24
3.Set	0,21	-0,82	0,12	0,17	0,23	-0,76	0,32	0,21
Karesel Ortalama Hata	0,19	0,58	0,09	0,20	0,17	0,54	0,38	0,28

Çizelge 6. 8 (2004468661) seri numaralı antenin iki set kombinasyonunun ortalama AFM'den farkları

Yükseklik Açısı 0°	L1 (mm)				L2 (mm)			
	FMO Kuzey	FMO Doğu	FMO Yük.	FMD KOH	FMO Kuzey	FMO Doğu	FMO Yük.	FMD KOH
4.Set	0,28	-0,03	0,04	0,21	0,43	-0,01	0,8	0,19
10.Set	-0,28	0,03	-0,04	0,21	-0,43	0,01	-0,8	0,19

Çizelge 6. 9 (2005429663) seri numaralı antenin son beş set kombinasyonunun ortalama AFM'den farkları

Yükseklik Açısı 0°	L1 (mm)				L2 (mm)			
	FMO Kuzey	FMO Doğu	FMO Yük.	FMD KOH	FMO Kuzey	FMO Doğu	FMO Yük.	FMD KOH
5.Set	-0,09	0,07	0,14	0,15	-0,03	0,08	0,03	0,18
6.Set	-0,13	-0,16	0,09	0,16	-0,09	-0,17	0,21	0,16
7.Set	-0,10	0,11	-0,26	0,13	-0,14	0,13	-0,41	0,13
8.Set	-0,01	0,07	-0,04	0,14	-0,10	0,10	0,10	0,18
9.Set	0,32	-0,10	0,07	0,11	0,36	-0,13	0,07	0,13
Karesel Ortalama Hata	0,16	0,11	0,14	0,14	0,18	0,13	0,21	0,16

Çizelge 6. 10 (2005429663) seri numaralı antenin sekiz set kombinasyonunun ortalama AFM'den farkları

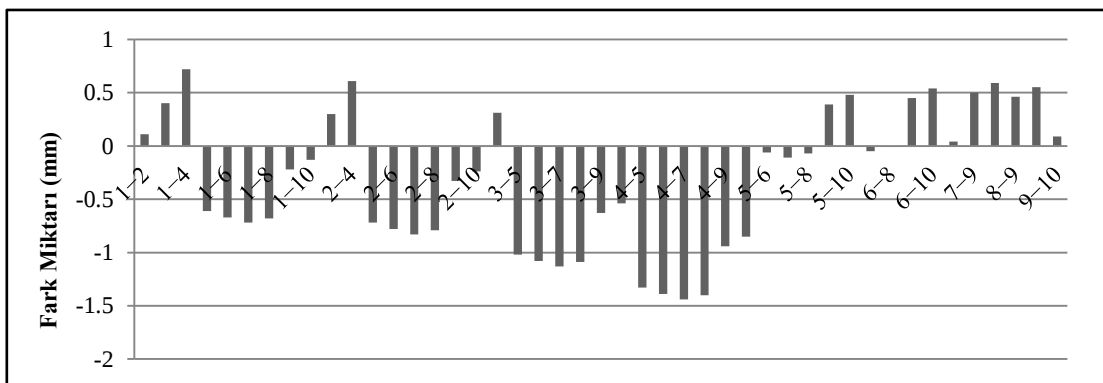
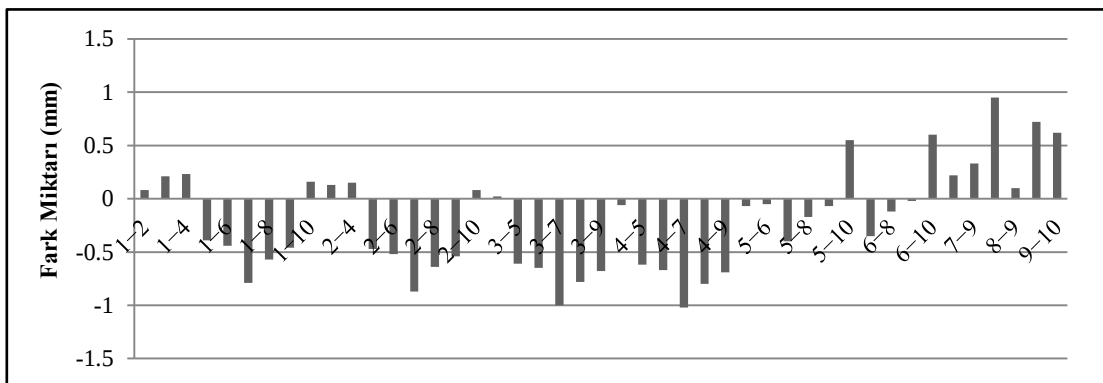
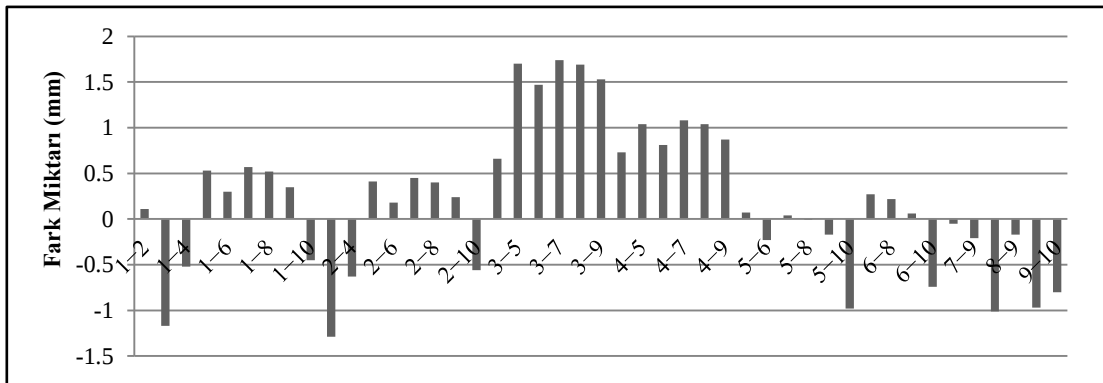
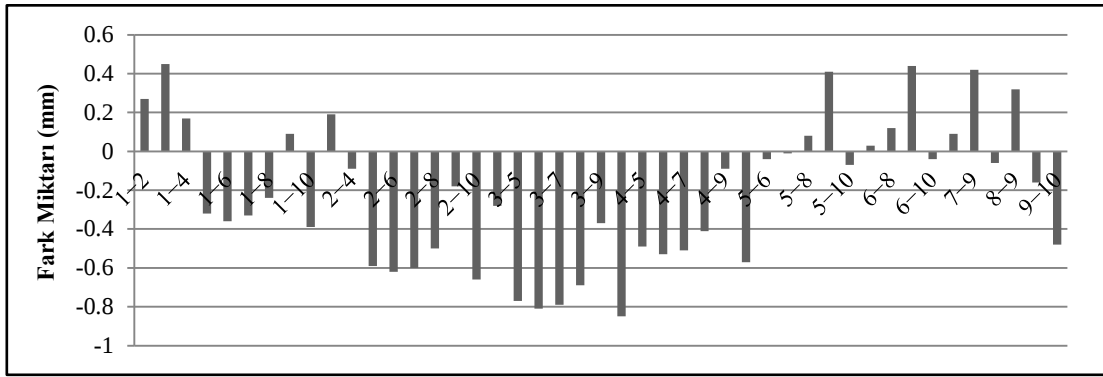
Yükseklik Açısı 0°	L1 (mm)				L2 (mm)			
	FMO Kuzey	FMO Doğu	FMO Yük.	FMD KOH	FMO Kuzey	FMO Doğu	FMO Yük.	FMD KOH
1.Set	0,06	-0,15	0,3	0,33	0,30	-0,24	0,64	0,41
2.Set	0,32	-0,04	0,37	0,26	0,41	-0,03	1,37	0,28
3.Set	0,51	-1,32	0,51	0,28	0,70	-1,27	1,49	0,30
5.Set	-0,26	0,38	-0,10	0,18	-0,31	0,39	-0,67	0,19
6.Set	-0,3	0,14	-0,15	0,22	-0,37	0,14	-0,49	0,19
7.Set	-0,28	0,42	-0,49	0,19	-0,42	0,44	-1,11	0,22
8.Set	-0,18	0,37	-0,27	0,18	-0,38	0,40	-0,60	0,20
9.Set	0,14	0,20	-0,17	0,18	0,08	0,18	-0,63	0,17
Karesel Ortalama Hata	0,29	0,54	0,33	0,23	0,41	0,53	0,95	0,26

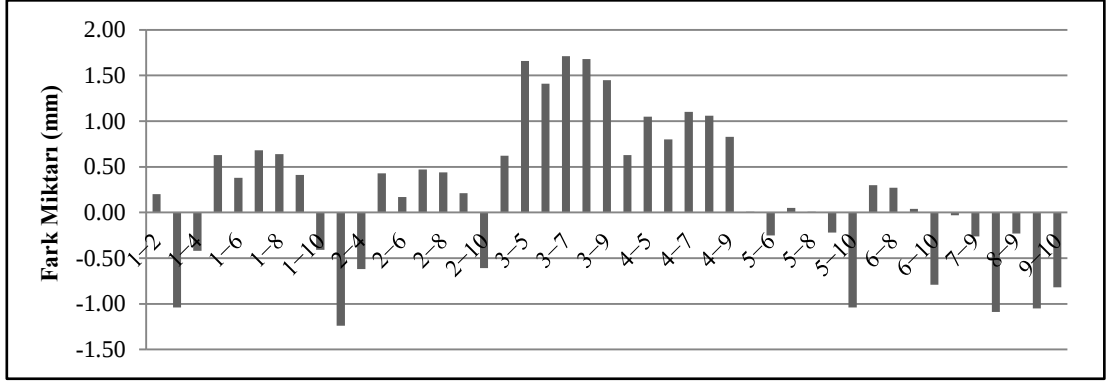
Çizelge 6. 11 Tüm setlerin kombinasyonunun ortalama AFM’den farkları

Yükseklik Açısı 0°	L1 (mm)				L2 (mm)			
	FMO Kuzey	FMO Doğu	FMO Yük.	FMD KOH	FMO Kuzey	FMO Doğu	FMO Yük.	FMD KOH
1.Set	0,07	-0,02	0,20	0,32	0,18	-0,11	0,58	0,42
2.Set	0,33	0,09	0,28	0,27	0,29	0,10	1,31	0,27
3.Set	0,52	-1,20	0,41	0,27	0,59	-1,14	1,43	0,27
4.Set	0,24	-0,54	0,43	0,33	0,90	-0,53	1,05	0,32
5.Set	-0,25	0,50	-0,20	0,21	-0,43	0,52	-0,73	0,20
6.Set	-0,29	0,27	-0,24	0,23	-0,49	0,27	-0,55	0,21
7.Set	-0,27	0,54	-0,59	0,21	-0,54	0,57	-1,17	0,24
8.Set	-0,17	0,50	-0,37	0,20	-0,50	0,53	-0,66	0,21
9.Set	0,15	0,33	-0,27	0,19	-0,04	0,31	-0,70	0,19
10.Set	-0,33	-0,47	0,35	0,35	0,05	-0,52	-0,55	0,22
Karesel Ortalama Hata	0,29	0,54	0,35	0,27	0,47	0,54	0,93	0,26

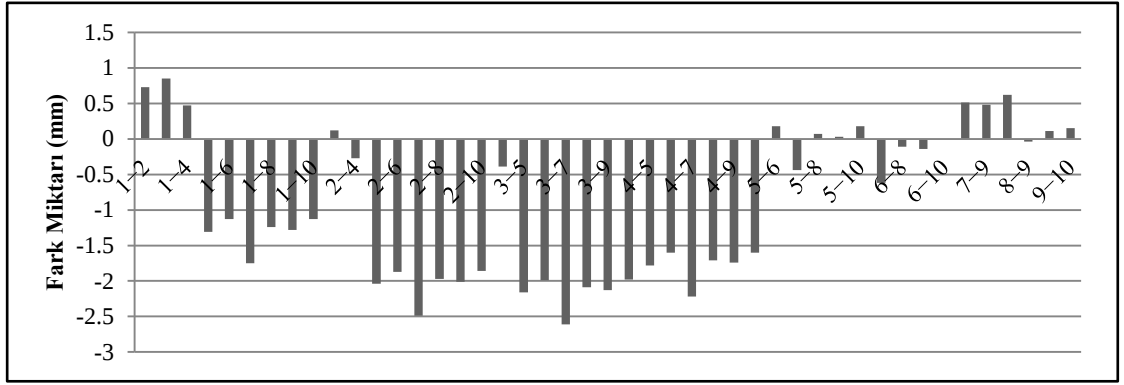
6.2.2.3 ANTEX Dosyalarının İç Karşılaştırması

Kalibrasyon verilerinin değerlendirilmesi ile elde edilen ANTEX dosyalarının tekrarlılığını araştırmak için CCANTEX programı aracılığıyla NGS parametreleri ile yapılan karşılaştırma işleminin aynısı ANTEX dosyaları arasında gerçekleştirilir. Her bir dosya birbiri ile karşılaştırılmıştır. Faz merkezi ötelemesi bileşenlerinin farkları grafik olarak ifade edilmiştir. Farkların tablo değerleri EK-B’ de verilmiştir.





Şekil 6. 35 L2 sinyali FMO doğu bileşenleri karşılaştırması



Şekil 6. 36 L2 sinyali FMO yükseklik bileşenleri karşılaştırması

6.2.3 Wa1/Kalib ve CCANTEX Uygulama Sonuçlarının Yorumlanması

Gerçekleştirilen kalibrasyon çalışmasının doğruluğu hakkında yorum yapabilmek için öncelikle tekrar edilebilirlikleri incelemek gerekmektedir. Faz merkezi ötelemelerinin yatay bileşenleri arasındaki farkların 1 mm değerinin altında olması beklenir. Bunun yanı sıra yükseklik bileşenindeki farklar 1 mm civarında, nadir olarak özellikle L2 frekansı için daha kötü olabilir. Konuyla ilgili ilk çalışmalar olması açısından özellikle ölçüm esnasında gözden kaçan etmenler de söz konusu olabilir. Bu nedenle ölçüm sayısı olabildiğince fazla olmalıdır.

Genel olarak elde edilen parametreler birbiri ile tutarlıdır. Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'teki yükseklik açısına bağlı faz merkezi değişimleri incelendiğinde, 10 dereceye kadar yükseklik açıları için değerlerde ufak farklar gözükmeyle beraber daha yüksek açılarda FMD değerleri çok iyi uyum göstermekte hatta neredeyse özdeş hale gelmektedir. Burada ilk akla gelen bu setlerin bir kısmı farklı mevsimsel etkiler altında gerçekleştirilmiştir. Örneğin ilk dört set kış koşullarında gerçekleştirilmişken geri kalan setler yaz aylarında gerçekleştirilmiştir. Burada anlatılmak istenen farklılıkların anten yapısında meydana gelecek değişimlerden de kaynaklanabileceğidir.

GPS konumlama doğruluğu da önemli bir faktördür. Wa1ANT programı ile elde edilen taşıyıcı faz gözlemi karesel ortalama hata değerleri 4 ile 5 mm arasında değişmektedir. Bu değerlerin ileride gerçekleştirilecek çalışmalarda mutlaka iyileştirilmesi gerekmektedir. Gerçekleştirilen gözlemler de kaba hatalı ölçü miktarı yok denecek kadar azdır. Bu da kalibrasyon bazının yer seçiminde neden çatıların seçildiği sorusuna iyi bir cevaptır.

MATLAB kullanılarak oluşturulan, Şekil 6.15'ten Şekil 6.24'e kadar verilen polar grafikler antenlerin azimut ve yükseklik açısına bağlı faz merkezi değişimi modellerini ifade etmektedir. Bu grafikler incelendiğinde modellerin birbirine uyumlu olduğu açıkça görülmektedir. NGS ile yapılan karşılaştırmalarda yatay FMO bileşenleri ile NGS değerleri arasındaki fark 0-2 mm arasında değişmektedir. Bu fark antenlerin arasındaki gerçek farklılıkları da yansıtır olabilir. Bunun dışında gerçekleştirilen her kalibrasyon setinde GPS alıcısı kaldırılıp, yeniden kurulmuştur. Yani her set kendi içinde farklı merkezleştirme hatasına da sahip olabilir. Yükseklik bileşenlerindeki farklar yalnızca L2 frekansında 2., 3. ve 4. setlerde 1 mm değerinin üzerinde çıkmıştır. Yükseklik bileşenlerinin NGS değerleri ile karşılaştırılması ölçüm sonuçları hakkında esas bilginin alındığı kısımdır. ARN noktasının doğru tanımlanması, anten yüksekliğinin hassas biçimde ölçülmesi ve kalibrasyon bazının iki ucundaki pilyelerin yükseklik farklarının hassas olarak belirlenmesi bu sonuçları etkileyen en önemli faktörlerdir. NGS tarafından belirlenen düşey FMO bileşenleri ile sağlanan bu uyum oldukça iyidir. CCANTEX ile gerçekleştirilen ANTEX dosyalarının birleştirilmesi yine önemli adımlardan biridir. Ölçülerin güvenilirliği arttırmak ve istatistiksel olarak değerlendirmeler yapabilmek için fazla ölçüye ihtiyaç duyulur. Sonuç olarak kalibrasyon işlemleri tamamlandıktan sonra antenler için tek bir dosya tanımlanır. Örneğin referans anteni Geo++ tarafından 15 kez kalibre edilmiştir. Gerekli analizler gerçekleştirilerek tek bir ANTEX dosyası oluşturulmuştur. Aynı işlem bu çalışmada CCANTEX ile gerçekleştirilmiş; birleştirilmiş anten dosyaları, bunların ortalama değerden olan farkları, karesel ortalama hataları ve faz merkezi değişimi karesel ortalama hataları elde edilmiştir. KOH değerleri ve ortalamadan olan sapmalar 1mm değerinden küçüktür. Yalnızca 3. kalibrasyon setinden elde edilen ANTEX dosyasına ait FMO doğu bileşenleri 1 mm'den daha büyük sapma göstermiştir. İlk kalibrasyon setleri aralık, ocak ve şubat aylarında gerçekleştirilmiştir. Daha sonra gerçekleştirilen ölçümler haziran ve temmuz aylarında gerçekleştirilmiştir (Çizelge 6.1). CCANTEX ile

gerçekleştirilen ANTEX dosyalarının iç karşılaştırma işleminde de, ANTEX dosyalarının birleştirilmesiyle elde edilen ortalamadan olan sapmalarda da açıkça görülmektedir ki yakın zaman aralıklarında gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen sonuçlar birbiri ile daha uyumludur. Örneğin 2.set ile 7.set sonucu elde edilen L2 frekansı için yükseklik bileşenleri arasındaki fark -2,49 mm olarak elde edilmiştir. L1 için elde edilen tekrarlılık değerleri oldukça iyidir. Yine 3. set kalibrasyon verilerinden elde edilen FMO doğu bileşenlerindeki farklılıklar Şekil 6.33 ve Şekil 6.36’da açık biçimde görülmektedir.

ANTEN PARAMETRELERİNİN AĞ ÇÖZÜMLERİNE ETKİSİ

Bu bölümde anten faz merkezi modellerinin uzun ve kısa baz çözümlerine olan etkileri araştırılmıştır.

7.1 Anten Kalibrasyon Modellerinin Uzun Bazlara Etkisi

Değerlendirmeler Bern Üniversitesi tarafından geliştirilen Bernese 5.0 akademik GPS değerlendirme yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Aslında yapılan işlem oldukça basittir. Bernese 5.0 yazılımının rutin değerlendirme adımları takip edilerek iki farklı çözüm gerçekleştirilmiştir. Bu çözümler arasındaki tek fark uydu ve anten faz merkezi parametrelerini içeren dosyaların seçimidir.

Bernese 5.0 yazılımında uydu ve alıcı anten faz merkezi modelleri Bernese dosya formatında mevcuttur [17]:

- SATELLIT.xxx dosyası uydulara özgü bilgileri, özellikle ilgili uydu anten faz modelleri ile uyumlu olması gereken uydulara özgü anten ötelemelerini içerir.
- PHAS_COD.xxx dosyası CODE tarafından günlük değerlendirmelerde kullanılan uydu ve anten faz merkezi bilgilerini içerir.

Bu dosyaların xxx uzantıları I01, I05 veya I08 olabilir. ITRF 08'in gerçekleşmesi ile beraber artık I05 kullanılmamaktadır. I01 uzantısı igs_01.atx IGS ANTEX dosyasına dayanan bağıl anten faz merkezi modellerini içeren dosyaları ifade eder. I08 uzantısı ise güncel igs08_www.atx IGS ANTEX dosyasına dayanan mutlak anten faz merkezi modellerini içeren dosyaları ifade eder [17]. Ağ çözümlerinde dikkat edilmesi gereken hususlardan biri de I01 ve I08 uzantılı dosyaların bir arada kullanılmamasıdır.

Çizelge 7. 1 Ağ çözümünde beraber kullanılacak dosyaların listesi [17]

Set	Dosyalar	ANTEX	Model
0	SATELLIT. PHAS_IGS.REL	-	IGS_01
1	SATELLIT.IO1 PHAS_COD.IO1	IO1.ATX	IGS_01
2	SATELLIT.IO5 PHAS_COD.IO5	IO5.ATX	IGS05_www
3	SATELLIT.IO8 PHAS_COD.IO8	IO8.ATX	IGS08_www

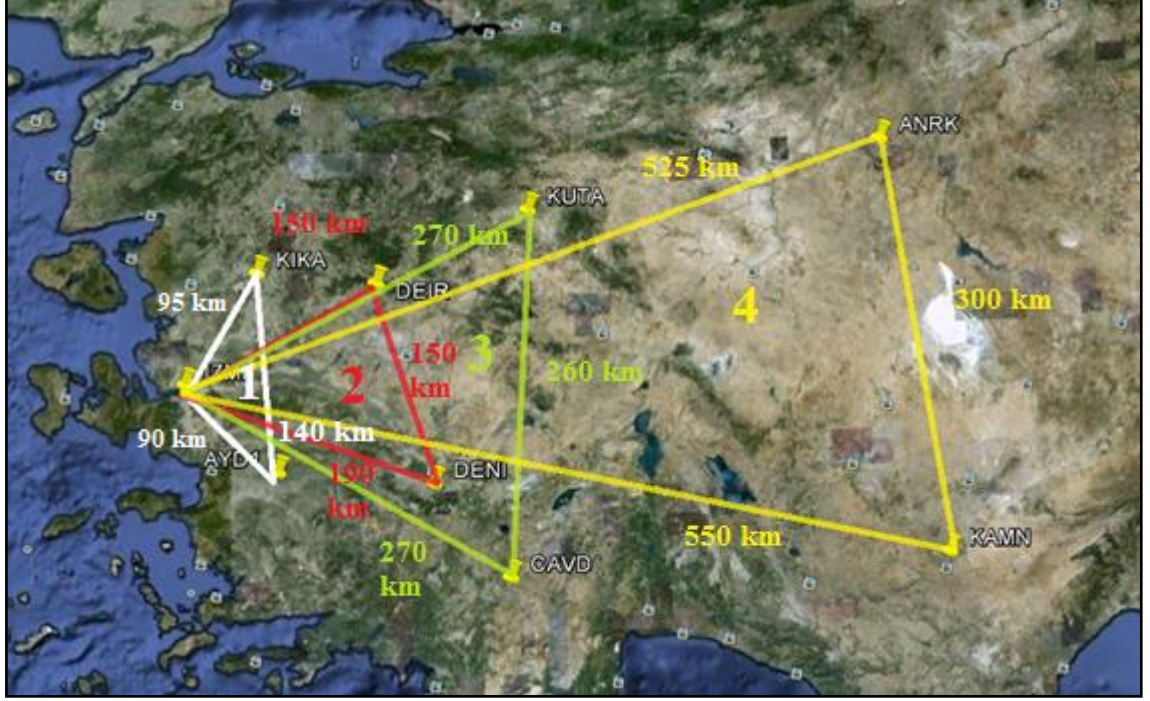
Anten dosyalarının ağ çözümlerine etkilerini araştırmak amacıyla üç farklı çalışma gerçekleştirilmiştir:

- CORS-TR noktalarından oluşan baz uzunluğu 500 km'ye kadar uzanan üçgen şeklindeki dört ağ üzerinde gerçekleştirilen değerlendirmeler
- Baz uzunluğu 1000 km'yi geçen, farklı anten türlerine sahip, üçgen şeklinde oluşturulan ağ üzerinde gerçekleştirilen değerlendirmeler
- Baz uzunluğu 1000 km'yi geçen, aynı anten türüne sahip, üçgen şeklinde oluşturulan ağ üzerinde gerçekleştirilen değerlendirmeler

7.1.1 500 Km'ye Kadar Baz Çözümleri

GNSS anten parametrelerinin ağ çözümlerine etkilerinin incelenmesi için ilk değerlendirmeler İstanbul Kültür Üniversitesi'nin (İKÜ) yürütücüsü ve Harita Genel Komutanlığı (HGK) ile Tapu ve Kadastro Genel Müdürlüğü'nün (TKGM) müşterisi olduğu Sürekli Gözlem Yapan GPS İstasyonları Ağı'nda (TUSAGA-Aktif/CORS-TR) yapılmıştır. En batıda İzmir'den başlayarak Ankara ve Karaman'da bulunan CORS-TR noktalarına kadar olan bir alanda İzmir noktası ortak olmak üzere dört farklı üçgen şeklinde, baz mesafeleri giderek artan dört ağ seçilmiştir. Her bir ağ için iki değerlendirme gerçekleştirilmiştir. Bu değerlendirmeler aynı günlere ait olup birinde bağıl anten faz merkezi dosyası PHAS_COD.IO1 kullanılmış, diğesinde ise mutlak anten faz merkezi dosyası PHAS_COD.IO5 kullanılmıştır. Uygulamada IZMI (İzmir), KİKA (Manisa), AYD1 (Aydın), DEIR (Afyon), DENI (Denizli), KUTA (Kütahya),

CAVD (Burdur), KAMN (Karaman) ve ANRK (Ankara) noktaları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar grafikler ile gösterilmiş ve sonuçlar yorumlanmıştır. İlk çözüm olarak her noktanın, kendine en yakın bir ve ya iki IGS istasyonuna göre koordinat kestirimi yapılmıştır. Daha sonra IZMI noktası ortak nokta olacak şekilde (IZMI sabit) minimum zorlamalı çözüm gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7. 1 CORS-TR noktaları ile oluşturulan üçgen şeklindeki ağlar

Çizelge 7. 2 Birinci ağ için bağıl AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar

NOKTA	X (m)	Y (m)	Z (m)	h (m)
IZMI	4456584,2873	2278765,5415	3939930,8704	74,9368
AYD1	4459716,7481	2355111,7475	3891560,4359	101,8147
KIKA	4389217,2373	2301675,1689	4001606,8749	241,2121

Çizelge 7. 3 Birinci ağ için mutlak AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar

NOKTA	X (m)	Y (m)	Z (m)	h (m)
IZMI	4456584,2875	2278765,5420	3939930,8715	74,9378
AYD1	4459716,7482	2355111,7482	3891560,4367	101,8156
KIKA	4389217,2377	2301675,1696	4001606,8768	241,2139

Çizelge 7. 4 İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları

NOKTA	Δh (mm)	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
IZMI	1,0	-0,20	-0,50	-1,10
AYD1	0,9	-0,10	-0,70	-0,80
KIKA	1,8	-0,40	-0,70	-1,90

Çizelge 7. 5 İkinci ağ için bağıl AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar

NOKTA	X (m)	Y (m)	Z (m)	h (m)
IZMI	4456584,2888	2278765,5357	3939930,8611	74,9300
DEIR	4354177,8230	2378749,0460	3995884,1963	890,9105
DENI	4412026,3084	2454909,0922	3884891,1334	471,1082

Çizelge 7. 6 İkinci ağ için mutlak AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar

NOKTA	X (m)	Y (m)	Z (m)	h (m)
IZMI	4456584,2902	2278765,5359	3939930,8636	74,9326
DEIR	4354177,8240	2378749,0461	3995884,1988	890,9129
DENI	4412026,3093	2454909,0921	3884891,1351	471,1098

Çizelge 7. 7 İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları

NOKTA	Δh (mm)	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
IZMI	2,6	-1,40	-0,20	-2,50
DEIR	2,4	-1,00	-0,10	-2,50
DENI	1,6	-0,90	0,10	-1,70

Çizelge 7. 8 Üçüncü ağ için bağıl AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar

NOKTA	X (m)	Y (m)	Z (m)	h (m)
IZMI	4456584,2866	2278765,5462	3939930,8591	74,9310
CAVD	4422142,0522	2521339,2962	3831921,0542	1130,4893
KUTA	4274186,0702	2457652,4661	4034348,4731	1076,3543

Çizelge 7. 9 Üçüncü ağ için mutlak AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar

NOKTA	X (m)	Y (m)	Z (m)	h (m)
IZMI	4456584,2892	2278765,5493	3939930,8651	74,9376
CAVD	4422142,0538	2521339,2985	3831921,0591	1130,4943
KUTA	4274186,0723	2457652,4687	4034348,4791	1076,3606

Çizelge 7. 10 İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları

NOKTA	Δh (mm)	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
IZMI	6,6	-2,60	-3,10	-6,00
CAVD	5,0	-1,60	-2,30	-4,90
KUTA	6,3	-2,10	-2,60	-6,00

Çizelge 7. 11 Dördüncü ağ için bağıl AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar

NOKTA	X (m)	Y (m)	Z (m)	h (m)
IZMI	4456584,2602	2278765,5414	3939930,8557	74,9087
ANRK	4119925,5450	2659815,3258	4066510,6879	1231,2562
KAMN	4256387,6618	2787453,4448	3835136,5143	1056,8790

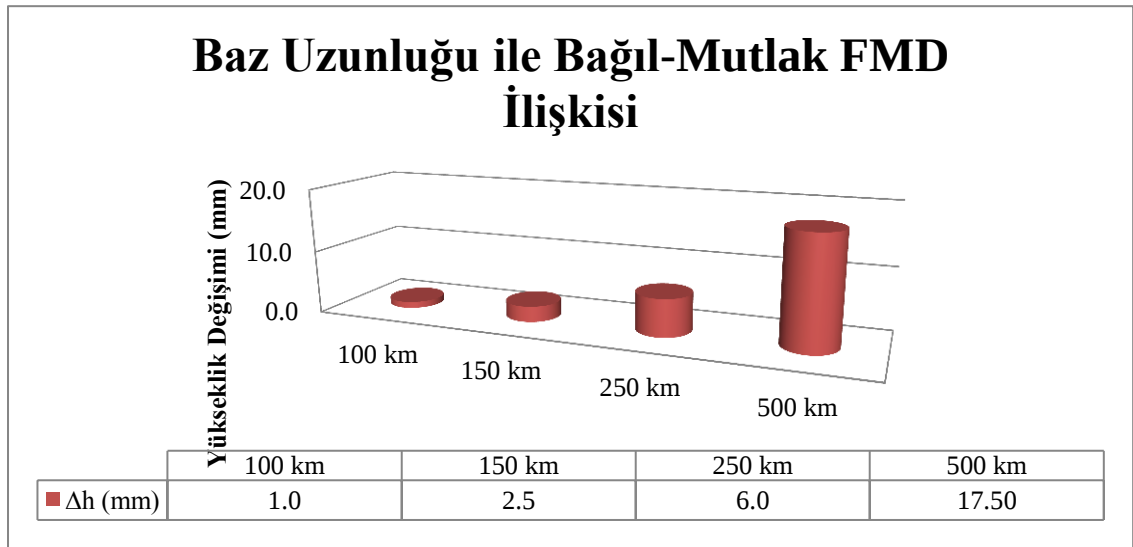
Çizelge 7. 12 Dördüncü ağ için mutlak AFM dosyası ile elde edilen koordinatlar

NOKTA	X (m)	Y (m)	Z (m)	h (m)
IZMI	4456584,2694	2278765,5467	3939930,8731	74,9278
ANRK	4119925,5528	2659815,3299	4066510,7049	1231,2739
KAMN	4256387,6688	2787453,4485	3835136,5298	1056,8947

Çizelge 7. 13 İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları

NOKTA	Δh (mm)	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
IZMI	19,10	-9,20	-5,30	-17,40
ANRK	17,70	-7,80	-4,10	-17,00
KAMN	15,70	-7,00	-3,70	-15,50

Üçgenler şeklinde oluşturulan aynı anten tipine sahip dört ağ üzerinde anten faz merkezi değişiminin sonuçlara olan etkisinin araştırılması için yapılan değerlendirmelerde noktalar arası baz mesafesi arttıkça özellikle yükseklik bileşeninin mutlak faz merkezi modeli ile bulunan değerleri ile bağıl faz merkezi modeli ile bulunan değerleri arasındaki fark artmaktadır. Baz mesafesi arttıkça bazın her iki ucundaki alıcıların aynı uyduları farklı yükseklik açıları ile görecek olmaları nedeniyle mutlak anten faz merkezi parametreleri kullanılmalıdır.



Şekil 7. 2 Anten dosyası seçiminin yüksekliğe etkisi

7.1.2 Farklı Anten Türleri İçeren Global Ağ Çözümü

EUREF Ağı bünyesinde Ukrayna'da bulunan POLV, Kıbrıs'da bulunan NICO ve IGS noktası olan Litvanya'da bulunan RIGA istasyonlarına ait 24 saatlik veriler değerlendirilmiş ve bu ağ da bir önceki çalışmada olduğu gibi üçgen olarak seçilmiş ve aynı rutin değerlendirme adımları takip edilmiştir

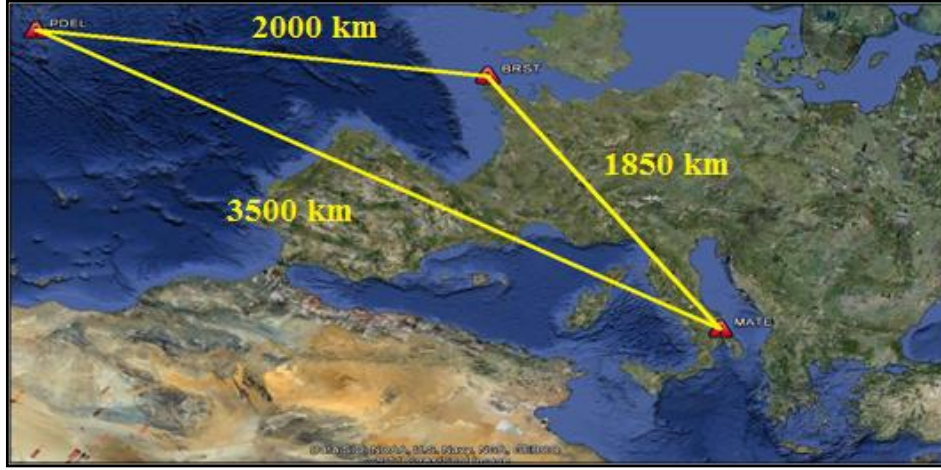


Şekil 7. 3 Farklı anten tiplerini içeren global ağ

Çizelge 7. 14 İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları

NOKTA	Δh (cm)	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)
NICO	3,33	0,56	2,81	2,92
POLV	3,02	-0,78	2,90	3,10
RIGA	3,15	-1,13	2,49	3,76

7.1.3 Aynı Anten Türleri İçeren Global Ağ Çözümü



Şekil 7. 4 Aynı anten tiplerini içeren global ağ

EUREF ağı bünyesinde bulunan aynı anten tipine sahip bu üç sürekli GPS istasyonunun 2011 yılının 1., 80. ve 81. GPS günlerine ait 24 saatlik verileri kullanılmış, anten dosyası seçiminin ağ çözümleri üzerine olan etkisinin sürekliliği incelenmiştir. Bu derece uzun bazlarda pratikte karşılaşılmayacağından bu çalışmanın amacı faz merkezi etkisini en açık şekliyle görmektir. 3 farklı güne ait sonuçların tümünde bağıl ve mutlak anten parametreleri ile gerçekleştirilen ağ çözümleri arasındaki farklar birbiri ile tutarlıdır ve yine özellikle yükseklik bileşeninde 13 ile 14 cm arasında değişen farklar mevcuttur.

Çizelge 7. 15 İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları (1)

NOKTA	Δh (cm)	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)
BRST	13,31	9,69	-3,32	8,99
MATE	13,61	10,76	-2,84	9,85
PDEL	14,33	10,25	-3,47	9,54

Çizelge 7. 16 İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları (80)

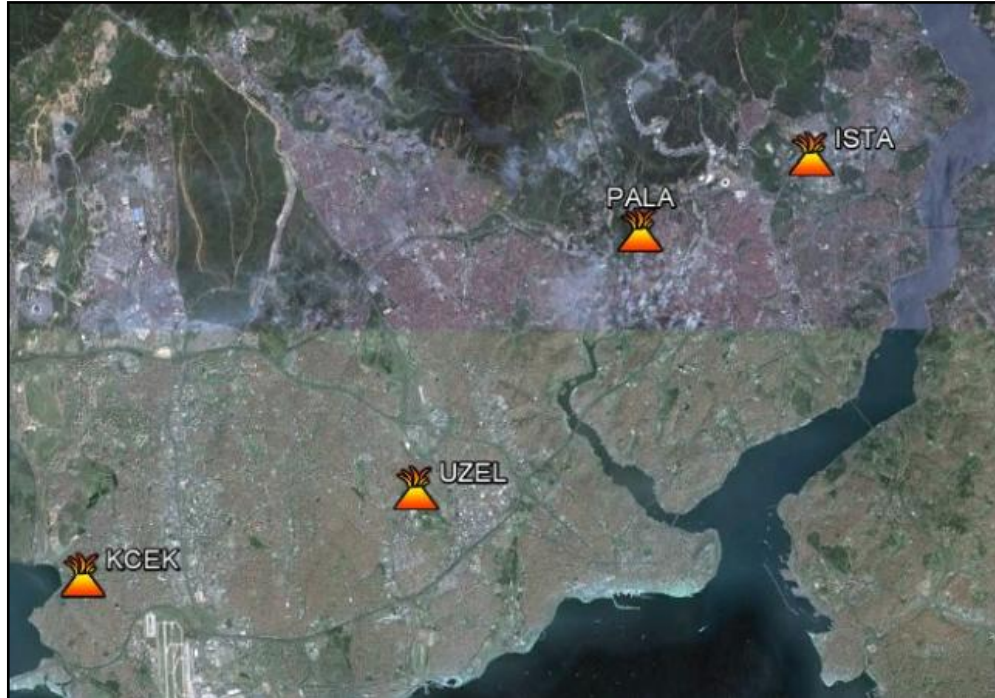
NOKTA	Δh (cm)	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)
BRST	14,15	9,52	-2,38	10,34
MATE	14,75	10,72	-2,00	11,36
PDEL	14,49	9,82	-2,43	10,88

Çizelge 7. 17 İki çözüm arasındaki koordinat ve yükseklik bileşenleri farkları (81)

NOKTA	Δh (cm)	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)
BRST	13,28	9,79	-1,91	8,97
MATE	14,19	11,02	-1,46	9,99
PDEL	13,73	10,14	-2,12	9,43

7.2 Anten Kalibrasyon Modellerinin Kısa Bazlara Etkisi

Anten parametrelerinin kısa bazlara olan etkisini incelemek için İstanbul ili içerisinde ISKI-UKBS ağı içinde bulunan KCEK (Küçük Çekmece), PALA (Kağıthane) noktaları ile İTÜ bünyesinde çalıştırılan ISTA ve YTÜ kalibrasyon pilyelerinden UZEL seçilerek yerel bir ağ oluşturulmuştur. Bu noktalara ilişkin iki farklı güne ait veriler Leica Geo Office 5.0 GNSS yazılımı ile değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerde antenlere ilişkin bağıl ve mutlak parametreler kullanılmıştır. Ayrı ayrı ağ çözümleri gerçekleştirilmiştir. Bağıl anten değerleri ile gerçekleştirilen çözümlerde yalnızca FMO ve FMO + FMD; mutlak anten değerleri ile gerçekleştirilen çözümlerde yalnızca FMO, FMO + yükseklik açısına bağlı FMD, FMO + azimut ve yükseklik açısına bağlı FMD seçenekleri seçilmiştir. Değerlendirmelerde 164. ve 171. GPS günlerine ait veriler kullanılmıştır.



Şekil 7. 5 ISKI-UKBS noktalarını içeren yerel ağ

Lokal bir ağda anten parametre seçimlerinin ağ çözümlerine etkisi araştırılmıştır ve kısa bazlarda bu etkinin uzun bazlara göre çok daha küçük olduğu görülmektedir. Yerel ağ çözümlerinde anten parametrelerinin seçiminin ağ çözümlerine etkisi milimetre mertebesindedir. Bağlı anten parametrelerinin seçiminde yükseklik açısına bağlı faz merkezi değişimi değerlerinin göz ardı edilmesi yükseklik değerine 2 mm civarında etki etmiştir. Bağlı model ile gerçekleştirilen ağ çözümleri ile mutlak model ile gerçekleştirilen ağ çözümlerinin arasında 2 ile 5 mm arasında değişen farklar görülür. Yalnızca mutlak faz merkezi ötelemelerinin kullanıldığı çözümle buna ilaveten faz merkezi değişimlerinin kullanıldığı çözüm arasındaki farklar 1 mm değerinin altındadır ve kısa bazlarda sonuçlara önemli bir etkisi olmamıştır. Kısa bazlarda özellikle aynı anten tiplerinin kullanıldığı ağlarda bağlı yöntemle kalibre edilmiş anten modellerinin kullanılması yeterlidir. Ancak antenlerin hepsinin kuzeye yönlendirilmesi gereklidir. Bu durumda fark yöntemleri ile anten faz merkezi değişiminin etkisi elimine edilir.

Çizelge 7. 18 PALA noktası 164. GPS günü için ağ çözüm sonuçları

	164.GPS GÜNÜ (m)	
	BAĞIL FMO	BAĞIL FMO ve FMD
X	4212288,8319	4212288,8335
Y	2331374,6176	2331374,6186
Z	4169765,7441	4169765,7456
h	170,5567	170,5591
	MUTLAK FMO	MUTLAK FMO ve FMD
X	4212288,8320	4212288,8316
Y	2331374,6182	2331374,6181
Z	4169765,7445	4169765,7441
h	170,5572	170,5567

Çizelge 7. 19 PALA noktası 171. GPS günü için ağ çözüm sonuçları

	171.GPS GÜNÜ (m)	
	BAĞIL FMO	BAĞIL FMO ve FMD
X	4212288,8317	4212288,8324
Y	2331374,6176	2331374,6189
Z	4169765,7420	4169765,7441
h	170,5551	170,5574
	MUTLAK FMO	MUTLAK FMO ve FMD
X	4212288,8311	4212288,8307
Y	2331374,6185	2331374,6185
Z	4169765,7428	4169765,7427
h	170,5557	170,5553

Çizelge 7. 20 KCEK noktası 164. GPS günü için ağ çözüm sonuçları

	164.GPS GÜNÜ (m)	
	BAĞIL FMO	BAĞIL FMO ve FMD
X	4225042,3457	4225042,3493
Y	2320792,7809	2320792,7830
Z	4162734,1219	4162734,1254
h	122,9081	122,9136
	MUTLAK FMO	MUTLAK FMO ve FMD
X	4225042,3454	4225042,3455
Y	2320792,7813	2320792,7810
Z	4162734,1237	4162734,1236
h	122,9092	122,9091

Çizelge 7. 21 KCEK noktası 171. GPS günü için ağ çözüm sonuçları

	171.GPS GÜNÜ (m)	
	BAĞIL FMO	BAĞIL FMO ve FMD
X	4225042,3459	4225042,3536
Y	2320792,7795	2320792,7818
Z	4162734,1156	4162734,1207
h	122,9036	122,9129
	MUTLAK FMO	MUTLAK FMO ve FMD
X	4225042,3495	4225042,3495
Y	2320792,7801	2320792,7798
Z	4162734,1184	4162734,1183
h	122,9081	122,9078

Çizelge 7. 22 KCEK noktası için anten parametrelerinin sonuçlara etkisi

KCEK (164.GPS GÜNÜ)	$\Delta X(\text{mm})$	$\Delta Y(\text{mm})$	$\Delta Z(\text{mm})$	$\Delta h(\text{mm})$
(Bağıl FMO)-(Bağıl FMO + FMD)	-3,6	-2,1	-3,5	-5,5
(Bağıl FMO)-(Mutlak FMO)	0,3	-0,4	-1,8	-1,1
(Mutlak FMO)-(Mutlak FMO +FMD)	-0,1	0,3	0,1	0,1
(Bağıl FMO + FMD)- (Mutlak FMO +FMD)	3,8	2,0	1,8	4,5
KCEK (171.GPS GÜNÜ)	$\Delta X(\text{mm})$	$\Delta Y(\text{mm})$	$\Delta Z(\text{mm})$	$\Delta h(\text{mm})$
(Bağıl FMO)-(Bağıl FMO + FMD)	-7,7	-2,3	-5,1	-9,3
(Bağıl FMO)-(Mutlak FMO)	-3,6	-0,6	-2,8	-4,5
(Mutlak FMO)-(Mutlak FMO +FMD)	0,0	0,3	0,1	0,3
(Bağıl FMO + FMD)- (Mutlak FMO +FMD)	4,1	2,0	2,4	5,1

Çizelge 7. 23 PALA noktası için anten parametrelerinin sonuçlara etkisi

PALA(164.GPS GÜNÜ)	$\Delta X(\text{mm})$	$\Delta Y(\text{mm})$	$\Delta Z(\text{mm})$	$\Delta h(\text{mm})$
(Bağıl FMO)-(Bağıl FMO + FMD)	-1,6	-1,0	-1,5	-2,4
(Bağıl FMO)-(Mutlak FMO)	-0,1	-0,6	-0,4	-0,5
(Mutlak FMO)-(Mutlak FMO +FMD)	0,4	0,1	0,4	0,5
(Bağıl FMO + FMD)- (Mutlak FMO +FMD)	1,9	0,5	1,5	2,4

Çizelge 7. 24 PALA noktası için anten parametrelerinin sonuçlara etkisi

PALA (171.GPS GÜNÜ)	$\Delta X(\text{mm})$	$\Delta Y(\text{mm})$	$\Delta Z(\text{mm})$	$\Delta h(\text{mm})$
(Bağıl FMO)-(Bağıl FMO + FMD)	-0,7	-1,3	-2,1	-2,3
(Bağıl FMO)-(Mutlak FMO)	0,6	-0,9	-0,8	-0,6
(Mutlak FMO)-(Mutlak FMO +FMD)	0,4	0,0	0,1	0,4
(Bağıl FMO + FMD)- (Mutlak FMO +FMD)	1,7	0,4	1,4	2,1

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yıldız Teknik Üniversitesi'nde gerçekleştirilen kalibrasyon uygulaması sonucunda THA800961+REC GPS anteninin mutlak faz merkezi düzeltmeleri elde edilmiştir. Farklı iki seri numaralı antenler için gerçekleştirilen tekrarlı ölçüler ile elde edilen sonuçlar birbirleri ile oldukça tutarlıdır. Yükseklik açısına bağlı L1 ve L2 FMD grafikleri incelendiğinde farklar multipath etkilerinin en yoğun olduğu ve bağlı kalibrasyon yönteminin mutlak yöntemlere karşı zayıf kaldığı 0-10 derece yükseklik açılarında ve veri sayısının oldukça azaldığı 80-90 derece yükseklik açılarında ortaya çıkmaktadır. Bu aralıklardaki farklar da 1 mm veya daha küçük değerlere sahiptir.

Sonuçların yorumlanmasında en önemli kriter NGS kalibrasyon dosyaları ile yapılan karşılaştırma işlemidir. Farklı bir disiplin tarafından gerçekleştirilmiş ve referans olarak kullanılan bu kalibrasyon değerleri ile elde ettiğimiz sonuçlar arasındaki farklar oldukça iyimserdir. FMO yatay bileşenleri arasındaki farklar 0 ile 2 mm arasındaki değişirken yükseklik bileşenleri arasındaki farklar L1 FMO bileşeni için tamamen, L2 FMO bileşeninin ise tamamına yakınında mm değerinden küçük farklar göstermektedir. Yükseklik bileşenlerinin karşılaştırılması anten kalibrasyon işleminin doğruluğunu ve güvenilirliğini görmek açısından en önemli kriterdir.

Yatay bileşenler arasındaki 0 ile 2 mm arasında değişen farklar antenler arasındaki gerçek farklılıkları gösteriyor olabilmekle beraber her sette alıcının toplanıp yeniden kurulması, her sette yeniden merkezlendirmeler yapılması bu farkların merkezlendirme hatalarından da kaynaklanabileceğini göstermektedir. Aynı şekilde ölçüm zamanlarının parça parça olması, ölçümlerin farklı mevsimlerde ve farklı hava koşullarında gerçekleştirilmesi sonuçları etkileyebilir. Özellikle yaz mevsiminde gerçekleştirilen ölçüm sonuçları oldukça iyidir. Elde edilen faz merkezi ofset değerlerini gösteren grafikler incelendiğinde GPS koordinatlarına etkileyen mevsimsel etkilerin FMO

değerleri içinde gözlendiği söylenebilir. Farklı mevsimlerde gerçekleştirilen ölçümlerle elde edilen parametreler sinüzoidal bir eğri oluşturacak şekilde değişim göstermektedir. Ancak bu varsayım farklı mevsim ve hava koşullarında ölçümler gerçekleştirilip, veri seti sayısı arttırılmadan bir kesinlik ifade etmemektedir.

Gözlem süresinin uzun olması oldukça zahmet vericidir. Bundan sonra gerçekleştirilecek çalışmalarla ölçü süresinin kısaltılması amaçlanmaktadır.

Her bir oturumda anten yüksekliklerinin aynı olması istenmektedir. Ancak bazı oturumlarda anten yüksekliği az miktarda farklı okunmuştur ve bu durumlarda ortalama değer kullanılmıştır. Anten yüksekliğini hatasız okuyabilecek, anten döndürme işleminde anten yüksekliğinin değişmemesini sağlayacak bir sistem kurulması zorunludur.

Ağ çözümü sonuçları göstermiştir ki baz mesafesi arttıkça (özellikle global ve bölgesel ağ çözümlerinde) aynı anten türleri de dahil olmak üzere antenlerin kuzeyi birbirine paralel olmaz ve bazın iki ucundaki alıcılar aynı yöne yönlendirilseler bile aynı uyduyu farklı azimut açıları ile görürler. Bu nedenle uzun baz çözümlerinde mutlaka mutlak faz merkezi modelleri kullanılmalıdır. Akademik GPS yazılımı ile özellikle baz mesafeleri 1000 km'yi aşan ağlarda bağıl ve mutlak modellerle gerçekleştirilen çalışmalarda iki çözüm arasındaki fark ortalama 3 cm'dir. Baz mesafesi 2000 ile 3000 km'lere kadar çıkan aynı anten türüne sahip ağda ise bağıl ve mutlak modellerle elde edilen çözümler arasındaki fark özellikle yükseklik bileşeninde 13 ile 14 cm arasındadır. Aynı anten tipine sahip CORS-TR noktaları ile gerçekleştirilen çözümlerde ise baz mesafesinin 500 km'ye ulaşması durumunda iki model ile elde edilen sonuçlar arasındaki farkın cm değerine ulaştığı görülmektedir. Daha kısa bazlarda farklar mm mertebesinde dir.

Yerel ağda ISKI-UKBS, UZEL ve ISTA noktalarına ait veriler anten modellerinin çeşitli varyasyonları oluşturularak değerlendirilmiştir. Yalnızca mutlak FMO kullanılmasıyla mutlak FMO ve FMD'nin beraber kullanılması arasında bir fark olmadığı görülmektedir. Ancak bağıl model kullanılması durumunda bağıl FMD'nin gözardı edilmesi çözümler arasında 2 ile 9 mm arasında değişen farkların oluşmasına neden olmuştur. Hem FMO hem de FMD değerlerinin beraber kullanıldığı bağıl ve mutlak modellerle elde edilen sonuçlar arasındaki farkın en fazla 5 mm olduğu görülür. Benzer biçimde yalnızca FMO değerlerinin kullanılması sonucu elde edilen farklar oldukça düşüktür. Bu modeller birbirlerinin yerine kullanılabilirler. Kısa bazlarda aynı

anten tipleri kullanılması ve aynı yöne yönlendirilmesi ile fark gözlemleri sonucu faz merkezi hatası elimine edilir. Ancak montaj hatalarının olabileceği unutulmamalıdır. Antenlerin herhangi bir darbeye maruz kalması (düşme vb.) durumunda mutlaka kalibrasyonları gerçekleştirilmelidir.

Büyük Ölçekli Harita ve Harita Bilgileri Üretim Yönetmeliği'nde anten faz merkezi değişimi göz önünde bulundurulmamış olup, herhangi bir bilgi verilmemiştir. Ancak Türkiye Ulusal Temel GNSS Ağı'nın sıklaştırılması kapsamında kullanıcılar tarafından pratikte en çok gerçekleştirilen çalışmalar Ana GNSS ağı (C1), Sıklaştırma GNSS Ağı (C2), Alım için Sıklaştırma GNSS Ağı (C3) ve poligon ağı uygulamalarıdır. Bu tür ağlarda baz mesafesi C1 için en çok 15-20 km değerine ulaşmaktadır ve bağlı konumlamada ikili fark gözlemleri yardımıyla anten faz merkezi değişiminin etkisi elimine edilir. Burada yine dikkat edilmesi gereken uygulamada kullanılan anten türleri ve anten yöneltilmeleridir. Özellikle RTK GNSS çalışmalarında gezici antenlerin yöneltilmelerinin göz ardı edilmesi de mutlak anten faz merkezi modellerinin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Bunun dışında anten faz merkezi modellerinin seçimi özellikle GPS nivelmanı gibi yükseklik bileşeni ile ilgili çalışmalarda önemlidir. Bunun nedeni anten faz merkezi değişiminin en çok yükseklik bileşeni üzerinde etkili olmasıdır. Çalışmadan beklenen doğruluk derecesi de anten parametrelerinin seçiminde belirleyici bir etmendir. Unutulmamalıdır ki anten faz merkezi değişimi GNSS ile hassas konumlamada göz önünde bulundurulması gereken hata kaynaklarından yalnızca biridir.

KAYNAKLAR

- [1] Kahveci, M. ve Yıldız, F., (2009). GPS/GNSS Uydularla Konum Belirleme Sistemleri Teori ve Uygulama, Geliştirilmiş 4. Baskı, Nobel Yayınları, 222, Ankara.
- [2] Hofmann-Wellonhof, B., Lichtenegger, H. ve Collins, J., (2001). Global Positioning System Theory and Practice, Revised 5th Edition, Springer, New York.
- [3] Xu, G., (2003). GPS Theory, Algorithms and Applications, Springer, New York.
- [4] Gülal, E., Akpınar, B., Aykut, N.O. ve Uygur, S.Ö., (2011). “GNSS Antenlerinin Faz Merkezi ve Değişiminin Araştırılması”, HKM Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, 105: 65-69, Ankara.
- [5] Langley, R.B., (1998). “A Primer on GPS Antennas”, GPS World, 9: 73-77.
- [6] Langley, R.B., (2009). “GNSS Antennas: An Introduction to Bandwidth, Gain Pattern, Polarization, and All That”, GPS World, 20: 42-48.
- [7] Görres, B., Campbell, J., Becker, M. ve Siemes, M., (2006). “Absolute Calibration of GPS Antennas: Laboratory results and comparison with field and robot techniques”, GPS Solutions, 10(2): 136-145.
- [8] Rothacher, M., (2001). “Comparison of Absolute and Relative Antenna Phase Center Variations”, GPS Solutions, 4 (4): 55-60.
- [9] Schmid R. ve Rothacher, M., (2003). “Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites”, Journal of Geodesy, 77: 440-446.
- [10] Mader, G.L., (1999). “GPS Antenna Calibration at the National Geodetic Survey”, GPS Solutions, 3 (1): 50-58.
- [11] Schupler, B.R. ve Clark, T.A., (1994). “Signal Characteristics of GPS User Antennas”, Navigation, Journal of the Institute of Navigation, 41(3): 277-295.
- [12] Zeimet, P. ve Kuhlmann, H., (2008). “On the Accuracy of Absolute GNSS Antenna Calibration and the Conception of a New Anechoic Chamber”. Proceedings of the FIG Working Week 2008, 14-19 June 2008, Stockholm.
- [13] Türk Standartları Enstitüsü, Metroloji ve Kalibrasyon Nedir – Ne İçin Gereklidir, <http://www.tse.org.tr/hizmetlerimiz/kalibrasyon-hizmetleri/metroloji-ve-kalibrasyon-hakk%C4%B1nda-genel-bilgi>, 31 Mayıs 2012.

- [14] EURAMET, (2008). Metrology – In Short, 3rd Edition, Danish Fundamental Metrology Ltd., Albertslund, Denmark.
- [15] Ulusal Metroloji Enstitüsü, http://www.ume.tubitak.gov.tr/menu_genel.php?f=101, 31 Mayıs 2012.
- [16] Langley, R.B., (1990). “Why is the GPS Signal So Complex?”, GPS World, 1: 56-59.
- [17] Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P. ve Meindl, M., (2007). Bernese GPS Software Version 5.0 (User Manual), University of Bern, Astronomical Institute, Bern.
- [18] Weston, N.D. ve Schwieger, V., (2010). “Cost Effective GNSS Positioning Techniques”, FIG Commission 5 Publication, 49, Copenhagen.
- [19] Yıldırım, K.E., Linux Altında Kablosuz Bağlantı, İTÜ Bilişim Enstitüsü Enformasyon Sistemlerinin Tasarımı ve Yönetimi, <http://web.itu.edu.tr/~mscelebi/est566/Lecture6.htm>, 31 Mayıs 2012.
- [20] Surathu, M., (1999). Investigating Global Positioning System Helibowl Antenna Performance Sensitivity With Variation Design Parameters, Master of Science Thesis, Ohio University Russ College of Engineering and Technology, Columbus.
- [21] Shakeeb, M., (2010). Circularly Polarized Microstrip Antenna, Master of Science Thesis, Concordia University, Canada.
- [22] Balanis, C.A., (2008). Modern Antenna Handbook, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [23] Boyer, L.L., (1999). Carrier-Phase Wrap-Up Caused By Rotating A Global Positioning System Antenna and Its Effect On Measurements, Master of Science Thesis, Ohio University Russ College of Engineering and Technology, Columbus.
- [24] Chen, L., (2007). Dual Frequency Patch Antenna Design For Global Navigation Satellite System, Master of Science Thesis, Ohio University Russ College of Engineering and Technology, Columbus.
- [25] Kunysz, W., (1998). “Effect of the Antenna Performance on GPS Signal Accuracy”, Proceeding of ION, National Technical Meeting 1998, Denver, Colorado.
- [26] Kuzu, L. ve Alkan, E., (2002). Microwave Planar Antenna Design, ELE 791 Project Report, Syracuse University Department of Electrical Engineering and Computer Science.
- [27] Langley, R.B., (1991). “The GPS Receiver: An Introduction”, GPS World, 2: 50-53.
- [28] Hopfield, H.S., (1969). “Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data”, Journal of Geophysical Research, 74(188): 4487-4499.
- [29] Erdoğan, S., Güllü, M., Baybura, T. ve Tiryakioğlu, İ., (2005). “Global Konum Belirlemede Hata Kaynakları”, Teknolojik Araştırmalar: YTED (Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, (2): 47-52.

- [30] Kaplan, E.D. ve Hegarty, C.J., (2005). Understanding GPS: Principles and Applications, 2nd Edition, Artech House, Boston.
- [31] Wells, D., Beck, N., Delikaraoglou, D., Kleusberg, A., Krakiwsky, E.J., Lachapelle, G., Langley, R.B., Nakiboglu, M., Schwarz, K.P., Tranquilla J.M. ve Vanicek, P., (1986). Guide to GPS Positioning, Canadian GPS Associates, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Lecture Note No. 58, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick.
- [32] Böder, V., (2002). Zur hochpräzisen GPS-Positions-und Lagebestimmung unter besonderer Berücksichtigung mariner Anwendungen, genehmigte Dissertation, Universität Hannover, Hannover.
- [33] Knöpfler, A., Mayer, M., Nuckelt, A., Heck, B. ve Schmitt, G., (2007). Untersuchungen zum Einfluss von Antennen-kalibrierwerten auf die Prozessierung regionaler GPS-Netze, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe.
- [34] Görres, B., (2001). “Zur Kalibrierung von GPS-Antennen”, Qualitätmanagement in der geodätischen Messtechnik, DVW-Schriftenreihe, 42: 206-221.
- [35] Campbell J., Görres B., Siemes M., Wirsch J. ve Becker M., (2004). “Zur Genauigkeit der GPS Antennenkalibrierung auf der Grundlage von Labormessungen und deren Vergleich mit anderen Verfahren”, Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN), 1:2-11.
- [36] Görres, B., (2009). “Aktueller Stand der GNSS-Antennenkalibrierung”, GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen, DVW-Schriftenreihe, 57: 223-246, Augsburg.
- [37] Wübbena, G., Schmitz, M., Menge, F., Böder, V. ve Seeber, G., (2000). “Automated Absolute Field Calibration of GPS-Antennas in Real-Time”, Proceedings of 13. International Technical Meeting of The Institute of Navigation, ION GPS 2000, 19-22 September 2000, Salt Lake City.
- [38] Chatzinikos, M., Fotiou, A. ve Pikridas, C., (2009). “The Effects of The Receiver and Satellite Antenna Phase Center Models On Local and Regional GPS Networks”, International Symposium “Modern Technologies, Education and Professional Practice In Geodesy and Related Fields”, 5-6 November 2009, Sofia.
- [39] Gendt, G. ve Schmid, R., (2005). IGSMail-5189:Planned changes to IGS antenna calibrations, IGS electronic mail, message number 5189 <http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2005/msg00111.html>, 31 Mayıs 2012.
- [40] Schmitz, M., Wübbena, G. ve Propp, M., (2008). “Absolute Robot-Based GNSS Antennas Calibration-Feature and Findings-”, Proceeding of International Symposium on GNSS, Space-based and Ground-based Augmentation Systems and Applications, 11-14 November 2008, Berlin.
- [41] Wübbena, G., Schmitz, M., Boettcher, G. ve Schumann C., (2006). “Absolute GNSS Antenna Calibration with a Robot: Repeatability of Phase Variations, Calibration of GLONASS and Determination of Carrier to Noise Pattern”, Proceedings of the IGS Workshop “Perspectives and Visions for 2010 and beyond”, 8-12 May 2006, Darmstadt.

- [42] Zeimetz, P. ve Kuhlmann, H., (2010). "Validation of the Laboratory Calibration of Geodetic Antennas based on GPS Measurements", FIG Congress, Sydney, Australia.
- [43] Wübbena, G., Menge, F., Schmitz, M., Seeber, G. ve Völksen, C., (1996). "A New Approach for Field Calibration of Absolute Antenna Phase Center Variations", ION GPS-96, Kansas City, Missouri.
- [44] Wanninger, L., (2009). Wa1ANT 2.0 Manuel, www.wasoft.de, 31/05/2012.

EK-A

WA1 BAZ ÇÖZÜM SONUÇLARI

Çizelge Ek-A. 1 Birinci sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları

1.Set (Yöneltmeler)	1.Gün(Kuzey)	2.Gün(Doğu)	3.Gün(Güney)	4.Gün(Batı)
Değerlendirme	Statik	Statik	Statik	Statik
Tamsayı Çözümü	100%	100%	100%	100%
KOH (So) (m)	0,0014	0,0014	0,0015	0,0014
Maksimum Uydu Sayısı	12	12	12	12
Minimum Uydu Sayısı	3	8	8	5
Ortalama Uydu Sayısı	9,9	9,9	9,8	9,8
Kayıt Aralığı	60	60	60	60
RFRN Anten Yüksekliği (m)	0,1332	0,1332	0,1332	0,1332
UZEL Anten Yüksekliği(m)	0,0831	0,0831	0,0831	0,0831
UZEL X (m) Koordinatı	4219312,9152	4219312,9126	4219312,9133	4219312,9153
UZEL Y (m) Koordinatı	2328109,9034	2328109,9050	2328109,9076	2328109,9058
UZEL Z (m) Koordinatı	4164454,2282	4164454,2297	4164454,2277	4164454,2259
ΔX (m)	-2,4127	-2,4153	-2,4146	-2,4126
ΔY (m)	4,3757	4,3773	4,3799	4,3781
ΔZ (m)	0,4909	0,4924	0,4904	0,4886
Baz Uzunluğu (m)	5,0209	5,0236	5,0254	5,0226
PDOP (Minimum)	0,7	0,7	0,7	0,7
PDOP (Ortalama)	1	1	1	1
PDOP (Maksimum)	1,6	1,6	1,6	4,1

Çizelge Ek-A. 2 İkinci sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları

2.Set (Yöneltmeler)	1.Gün(Kuzey)	2.Gün(Doğu)	3.Gün(Güney)	4.Gün (Batı)
Değerlendirme	Statik	Statik	Statik	Statik
Tamsayı Çözümü	100%	100%	100%	100%
KOH (So) (m)	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Maksimum Uydu Sayısı	12	12	12	12
Minimum Uydu Sayısı	8	8	8	8
Ortalama Uydu Sayısı	10,2	10,3	10,2	10,2
Kayıt Aralığı	60	60	60	60
RFRN Anten Yüksekliği (m)	0,1332	0,1332	0,1332	0,1332
UZEL Anten Yüksekliği(m)	0,0804	0,0804	0,0804	0,0804
UZEL X (m) Koordinatı	4219312,9142	4219312,9122	4219312,9134	4219312,9154
UZEL Y (m) Koordinatı	2328109,9047	2328109,9068	2328109,9091	2328109,9074
UZEL Z (m) Koordinatı	4164454,2285	4164454,2299	4164454,2276	4164454,2265
ΔX (m)	-2,4137	-2,4157	-2,4145	-2,4125
ΔY (m)	4,3770	4,3791	4,3814	4,3797
ΔZ (m)	0,4912	0,4926	0,4903	0,4892
Baz Uzunluğu (m)	5,0225	5,0254	5,0266	5,0241
PDOP (Minimum)	0,7	0,7	0,7	0,7
PDOP (Ortalama)	0,9	0,9	0,9	0,9
PDOP (Maksimum)	1,8	1,8	1,8	2,0

Çizelge Ek-A. 3 Üçüncü sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları

3.Set (Yöneltmeler)	1.Gün(Kuzey)	2.Gün(Doğu)	3.Gün(Güney)	4.Gün (Batı)
Değerlendirme	Statik	Statik	Statik	Statik
Tamsayı Çözümü	100%	100%	100%	100%
KOH (So) (m)	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Maksimum Uydu Sayısı	12	12	12	12
Minimum Uydu Sayısı	8	8	8	8
Ortalama Uydu Sayısı	10,2	10,2	10,2	10,2
Kayıt Aralığı	60	60	60	60
RFRN Anten Yüksekliği (m)	0,1332	0,1332	0,1332	0,1332
UZEL Anten Yüksekliği(m)	0,0807	0,0807	0,0807	0,0807
UZEL X (m) Koordinatı	4219312,9153	4219312,9118	4219312,9124	4219312,9168
UZEL Y (m) Koordinatı	2328109,9035	2328109,9065	2328109,9104	2328109,9071
UZEL Z (m) Koordinatı	4164454,2285	4164454,2303	4164454,2280	4164454,2257
ΔX (m)	-2,4126	-2,4161	-2,4155	-2,4111
ΔY (m)	4,3758	4,3788	4,3827	4,3794
ΔZ (m)	0,4912	0,4930	0,4907	0,4884
Baz Uzunluğu (m)	5,0210	5,0254	5,0283	5,0230
PDOP (Minimum)	0,7	0,7	0,7	0,7
PDOP (Ortalama)	0,9	0,9	0,9	0,9
PDOP (Maksimum)	1,7	1,7	1,7	2,0

Çizelge Ek-A. 4 Dördüncü sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları

4.Set (Yöneltmeler)	1.Gün(Kuzey)	2.Gün(Doğu)	3.Gün(Güney)	4.Gün(Batı)
Değerlendirme	Statik	Statik	Statik	Statik
Tamsayı Çözümü	100%	100%	100%	100%
KOH (So) (m)	0,0015	0,0015	0,0016	0,0015
Maksimum Uydu Sayısı	12	12	12	12
Minimum Uydu Sayısı	5	8	8	8
Ortalama Uydu Sayısı	10,1	10,2	10,2	10,2
Kayıt Aralığı	60	60	60	60
RFRN Anten Yüksekliği(m)	0,1332	0,1332	0,1332	0,1332
UZEL Anten Yüksekliği(m)	0,0809	0,0809	0,0809	0,0809
UZEL X (m) Koordinatı	4219312,9147	4219312,9118	4219312,9122	4219312,9160
UZEL Y (m) Koordinatı	2328109,9045	2328109,9063	2328109,9097	2328109,9071
UZEL Z (m) Koordinatı	4164454,2286	4164454,2302	4164454,2284	4164454,2264
ΔX (m)	-2,4132	-2,4161	-2,4157	-2,4119
ΔY (m)	4,3768	4,3786	4,3820	4,3794
ΔZ (m)	0,4913	0,4929	0,4911	0,4891
Baz Uzunluğu (m)	5,0221	5,0252	5,0278	5,0235
PDOP (Minimum)	0,7	0,7	0,7	0,7
PDOP (Ortalama)	0,9	0,9	0,9	0,9
PDOP (Maksimum)	2,2	1,7	1,7	1,7

Çizelge Ek-A. 5 Beşinci sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları

5.Set (Yöneltmeler)	1.Gün(Kuzey)	2.Gün (Doğu)	3.Gün(Güney)	4.Gün (Batı)
Değerlendirme	Statik	Statik	Statik	Statik
Tamsayı Çözümü	100%	100%	100%	100%
KOH (So) (m)	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Maksimum Uydu Sayısı	12	12	12	12
Minimum Uydu Sayısı	7	7	7	7
Ortalama Uydu Sayısı	9,8	9,8	9,8	9,8
Kayıt Aralığı	60	60	60	60
RFRN Anten Yüksekliği (m)	0,1332	0,1332	0,1332	0,1332
UZEL Anten Yüksekliği(m)	0,0831	0,0831	0,0831	0,0831
UZEL X (m) Koordinatı	4219312,9137	4219312,9115	4219312,9122	4219312,9139
UZEL Y (m) Koordinatı	2328109,9049	2328109,9061	2328109,9078	2328109,9073
UZEL Z (m) Koordinatı	4164454,2275	4164454,2289	4164454,2276	4164454,2261
ΔX (m)	-2,4142	-2,4164	-2,4157	-2,4140
ΔY (m)	4,3772	4,3784	4,3801	4,3796
ΔZ (m)	0,4902	0,4916	0,4903	0,4888
Baz Uzunluğu (m)	5,0228	5,0251	5,0260	5,0247
PDOP (Minimum)	0,7	0,7	0,7	0,7
PDOP (Ortalama)	1,0	1,0	1,0	1,0
PDOP (Maksimum)	1,7	1,7	1,7	1,7

Çizelge Ek-A. 6 Altıncı sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları

6.Set (Yöneltmeler)	1.Gün(Kuzey)	2.Gün (Doğu)	3.Gün(Güney)	4.Gün (Batı)
Değerlendirme	Statik	Statik	Statik	Statik
Tamsayı Çözümü	100%	100%	100%	100%
KOH (So) (m)	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Maksimum Uydu Sayısı	12	12	12	12
Minimum Uydu Sayısı	7	7	7	7
Ortalama Uydu Sayısı	9,8	9,8	9,7	9,8
Kayıt Aralığı	60	60	60	60
RFRN Anten Yüksekliği(m)	0,1332	0,1332	0,1332	0,1332
UZEL Anten Yüksekliği (m)	0,0831	0,0831	0,0831	0,0831
UZEL X (m) Koordinatı	4219312,9131	4219312,9118	4219312,9122	4219312,9133
UZEL Y (m) Koordinatı	2328109,9039	2328109,9050	2328109,9085	2328109,9072
UZEL Z (m) Koordinatı	4164454,2283	4164454,2291	4164454,2272	4164454,2267
ΔX (m)	-2,4148	-2,4161	-2,4157	-2,4146
ΔY (m)	4,3762	4,3773	4,3808	4,3795
ΔZ (m)	0,4910	0,4918	0,4899	0,4894
Baz Uzunluğu (m)	5,0224	5,0239	5,0266	5,0250
PDOP (Minimum)	0,7	0,7	0,7	0,7
PDOP (Ortalama)	1,0	1,0	1,0	1,0
PDOP (Maksimum)	1,7	1,7	1,7	1,7

Çizelge Ek-A. 7 Yedinci sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları

7.Set (Yöneltmeler)	1.Gün(Kuzey)	2.Gün (Doğu)	3.Gün(Güney)	4.Gün (Batı)
Değerlendirme	Statik	Statik	Statik	Statik
Tamsayı Çözümü	100%	100%	100%	100%
KOH (So) (m)	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Maksimum Uydu Sayısı	12	12	12	12
Minimum Uydu Sayısı	7	7	5	7
Ortalama Uydu Sayısı	9,8	9,8	9,7	9,7
Kayıt Aralığı	60	60	60	60
RFRN Anten Yüksekliği (m)	0,1332	0,1332	0,1332	0,1332
UZEL Anten Yüksekliği(m)	0,0831	0,0831	0,0831	0,0831
UZEL X (m) Koordinatı	4219312,9128	4219312,9114	4219312,9125	4219312,9136
UZEL Y (m) Koordinatı	2328109,9048	2328109,9046	2328109,9077	2328109,9068
UZEL Z (m) Koordinatı	4164454,2278	4164454,2294	4164454,2271	4164454,2262
ΔX (m)	-2,4151	-2,4165	-2,4154	-2,4143
ΔY (m)	4,3771	4,3769	4,3800	4,3791
ΔZ (m)	0,4905	0,4921	0,4898	0,4889
Baz Uzunluğu (m)	5,0231	5,0239	5,0258	5,0243
PDOP (Minimum)	0,7	0,7	0,7	0,7
PDOP (Ortalama)	1,0	1,0	1,0	1,0
PDOP (Maksimum)	1,7	1,7	2,7	1,7

Çizelge Ek-A. 8 Sekizinci sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları

8.Set (Yöneltmeler)	1.Gün(Kuzey)	2.Gün (Doğu)	3.Gün(Güney)	4.Gün (Batı)
Değerlendirme	Statik	Statik	Statik	Statik
Tamsayı Çözümü	100%	100%	100%	100%
KOH (So) (m)	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Maksimum Uydu Sayısı	12	12	12	12
Minimum Uydu Sayısı	7	7	5	7
Ortalama Uydu Sayısı	9,7	9,8	9,7	9,7
Kayıt Aralığı	60	60	60	60
RFRN Anten Yüksekliği (m)	0,1332	0,1332	0,1332	0,1332
UZEL Anten Yüksekliği(m)	0,0831	0,0831	0,0831	0,0831
UZEL X (m) Koordinatı	4219312,9130	4219312,9117	4219312,9122	4219312,9138
UZEL Y (m) Koordinatı	2328109,9049	2328109,9053	2328109,9079	2328109,9068
UZEL Z (m) Koordinatı	4164454,2280	4164454,2293	4164454,2271	4164454,2259
ΔX (m)	-2,4149	-2,4162	-2,4157	-2,4141
ΔY (m)	4,3772	4,3776	4,3802	4,3791
ΔZ (m)	0,4907	0,4920	0,4898	0,4886
Baz Uzunluğu (m)	5,0232	5,0243	5,0261	5,0243
PDOP (Minimum)	0,7	0,7	0,7	0,7
PDOP (Ortalama)	1,0	1,0	1,0	1,0
PDOP (Maksimum)	1,7	1,7	2,7	1,7

Çizelge Ek-A. 9 Dokuzuncu sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları

9.Set (Yöneltmeler)	1.Gün(Kuzey)	2.Gün (Doğu)	3.Gün(Güney)	4.Gün (Batı)
Değerlendirme	Statik	Statik	Statik	Statik
Tamsayı Çözümü	100%	100%	100%	100%
KOH (So) (m)	0,0015	0,0028	0,0015	0,0015
Maksimum Uydu Sayısı	12	12	12	12
Minimum Uydu Sayısı	6	7	7	7
Ortalama Uydu Sayısı	9,8	9,8	9,8	9,7
Kayıt Aralığı	60	60	60	60
RFRN Anten Yüksekliği(m)	0,1332	0,1332	0,1332	0,1332
UZEL Anten Yüksekliği(m)	0,0831	0,0831	0,0831	0,0831
UZEL X (m) Koordinatı	4219312,9131	4219312,9118	4219312,9127	4219312,9144
UZEL Y (m) Koordinatı	2328109,9046	2328109,9054	2328109,9084	2328109,9068
UZEL Z (m) Koordinatı	4164454,2282	4164454,2293	4164454,2269	4164454,2261
ΔX (m)	-2,4148	-2,4161	-2,4152	-2,4135
ΔY (m)	4,3769	4,3777	4,3807	4,3791
ΔZ (m)	0,4909	0,4920	0,4896	0,4888
Baz Uzunluğu (m)	5,0229	5,0243	5,0263	5,0240
PDOP (Minimum)	0,7	0,7	0,7	0,7
PDOP (Ortalama)	1,0	0,9	0,9	1,0
PDOP (Maksimum)	1,7	1,7	1,7	1,7

Çizelge Ek-A. 10 Onuncu sete ilişkin 4 günlük baz çözümü sonuçları

10.Set (Yöneltmeler)	1.Gün(Kuzey)	2.Gün (Doğu)	3.Gün(Güney)	4.Gün (Batı)
Değerlendirme	Statik	Statik	Statik	Statik
Tamsayı Çözümü	100%	100%	100%	99,9%
KOH (So) (m)	0,0015	0,0015	0,0016	0,0015
Maksimum Uydu Sayısı	12	12	12	12
Minimum Uydu Sayısı	3	7	7	7
Ortalama Uydu Sayısı	9,7	9,7	9,6	9,6
Kayıt Aralığı	60	60	60	60
RFRN Anten Yüksekliği (m)	0,1332	0,1332	0,1332	0,1332
UZEL Anten Yüksekliği(m)	0,0831	0,0831	0,0831	0,0831
UZEL X (m) Koordinatı	4219312,9143	4219312,9114	4219312,9118	4219312,9146
UZEL Y (m) Koordinatı	2328109,9041	2328109,9051	2328109,9088	2328109,9071
UZEL Z (m) Koordinatı	4164454,2277	4164454,2301	4164454,2281	4164454,2259
ΔX (m)	-2,4136	-2,4165	-2,4161	-2,4133
ΔY (m)	4,3764	4,3774	4,3811	4,3794
ΔZ (m)	0,4904	0,4928	0,4908	0,4886
Baz Uzunluğu (m)	5,0218	5,0243	5,0272	5,0241
PDOP (Minimum)	0,7	0,7	0,7	0,7
PDOP (Ortalama)	1,0	1,0	1,0	1,0
PDOP (Maksimum)	1,9	1,6	1,6	1,6

FMO DEĞERLERİNİN İÇ KARŞILAŞTIRILMASI

Çizelge Ek-B. 1 FMO karşılaştırması, [1-10]

	L1 (mm) Δ FMO			L2 (mm) Δ FMO		
SETLER	ΔK	ΔD	ΔY	ΔK	ΔD	ΔY
1-2	0,27	0,11	0,08	0,11	0,20	0,73
1-3	0,45	-1,17	0,21	0,40	-1,04	0,85
1-4	0,17	-0,52	0,23	0,72	-0,42	0,47
1-5	-0,32	0,53	-0,39	-0,61	0,63	-1,31
1-6	-0,36	0,30	-0,44	-0,67	0,38	-1,13
1-7	-0,33	0,57	-0,79	-0,72	0,68	-1,75
1-8	-0,24	0,52	-0,57	-0,68	0,64	-1,24
1-9	0,09	0,35	-0,46	-0,22	0,41	-1,28
1-10	-0,39	-0,45	0,16	-0,13	-0,41	-1,13

Çizelge Ek-B. 2 FMO karşılaştırması, [2-10] ve [3-10]

	L1 (mm) Δ FMO			L2 (mm) Δ FMO		
SETLER	Δ K	Δ D	Δ Y	Δ K	Δ D	Δ Y
2-3	0,19	-1,29	0,13	0,30	-1,24	0,12
2-4	-0,09	-0,63	0,15	0,61	-0,62	-0,27
2-5	-0,59	0,41	-0,47	-0,72	0,43	-2,04
2-6	-0,62	0,18	-0,52	-0,78	0,17	-1,87
2-7	-0,60	0,45	-0,87	-0,83	0,47	-2,49
2-8	-0,50	0,40	-0,64	-0,79	0,44	-1,97
2-9	-0,18	0,24	-0,54	-0,33	0,21	-2,01
2-10	-0,66	-0,56	0,08	-0,24	-0,61	-1,86
3-4	-0,28	0,66	0,02	0,31	0,62	-0,39
3-5	-0,77	1,70	-0,61	-1,02	1,66	-2,16
3-6	-0,81	1,47	-0,65	-1,08	1,41	-1,99
3-7	-0,79	1,74	-1,00	-1,13	1,71	-2,61
3-8	-0,69	1,69	-0,78	-1,09	1,68	-2,09
3-9	-0,37	1,53	-0,68	-0,63	1,45	-2,13
3-10	-0,85	0,73	-0,06	-0,54	0,63	-1,98

Çizelge Ek-B. 3 FMO karşılaştırması, [4-10], [5-10] ve [6-10]

	L1 (mm) Δ FMO			L2 (mm) Δ FMO		
SETLER	Δ K	Δ D	Δ Y	Δ K	Δ D	Δ Y
4-5	-0,49	1,04	-0,62	-1,33	1,05	-1,78
4-6	-0,53	0,81	-0,67	-1,39	0,80	-1,60
4-7	-0,51	1,08	-1,02	-1,44	1,10	-2,22
4-8	-0,41	1,04	-0,80	-1,40	1,06	-1,71
4-9	-0,09	0,87	-0,69	-0,94	0,83	-1,74
4-10	-0,57	0,07	-0,07	-0,85	0,01	-1,60
5-6	-0,04	-0,23	-0,05	-0,06	-0,25	0,18
5-7	-0,01	0,04	-0,40	-0,11	0,05	-0,44
5-8	0,08	-0,01	-0,17	-0,07	0,01	0,07
5-9	0,41	-0,17	-0,07	0,39	-0,22	0,03
5-10	-0,07	-0,98	0,55	0,48	-1,04	0,18
6-7	0,03	0,27	-0,35	-0,05	0,30	-0,62
6-8	0,12	0,22	-0,12	-0,01	0,27	-0,11
6-9	0,44	0,06	-0,02	0,45	0,04	-0,14
6-10	-0,04	-0,74	0,60	0,54	-0,79	0,00

Çizelge Ek-B. 4 FMO karşılaştırması, [7-10], [8-10] ve [9-10]

	L1 (mm) Δ FMO			L2 (mm) Δ FMO		
SETLER	ΔK	ΔD	ΔY	ΔK	ΔD	ΔY
7-8	0,09	-0,05	0,22	0,04	-0,03	0,51
7-9	0,42	-0,21	0,33	0,50	-0,26	0,48
7-10	-0,06	-1,01	0,95	0,59	-1,09	0,62
8-9	0,32	-0,17	0,10	0,46	-0,23	-0,04
8-10	-0,16	-0,97	0,72	0,55	-1,05	0,11
9-10	-0,48	-0,80	0,62	0,09	-0,82	0,15

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Süreyya Özgür UYGUR
Doğum Tarihi ve Yeri :17.03.1986 / İstanbul
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :ozguruygurjfm@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Harita Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lisans	Harita Müh.	Yıldız Teknik Üniversitesi	2009
Lise	Fen	Burak Bora Anadolu Lisesi	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011	Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü	Araş. Gör.

YAYINLARI

Makale

1. Gülal, E., Akpınar, B., Aykut N.O., Uygur S.Ö., “GNSS Antenlerinin Faz Merkezi ve Değişiminin Araştırılması”, HKM Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi, Sayı 105, Sayfa 65-69, Ankara, 2011.

Bildiri

1. Gülal, E., Akpınar, B., Aykut N.O., Uygur S.Ö., “GNSS Antenlerinin Faz Merkezi ve Değişiminin Araştırılması”, TMMOB Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 18-22 Nisan 2011, Ankara.