

175792

**GPS SABİT İSTASYONLARINDA ZAMAN SERİLERİ
ANALİZİ**

DOKTORA TEZİ
Y. Müh. Mehmet Güven KOÇAK
(501992406)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 20 Mayıs 2004
Tezin Savunulduğu Tarih : 9 Temmuz 2004

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Tevfik AYAN
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Hüseyin DEMİREL (Y.T.Ü)
Prof.Dr. Şenol KUŞÇU (Z.K.Ü)
Prof.Dr. Rasim DENİZ (İ.T.Ü)
Doç.Dr. Semih ERGİNTAV (TÜBİTAK-MAM)

TEMMUZ 2004

ÖNSÖZ

Öncelikle bu çalışmanın gerçekleşmesinde bana rehberlik eden, tezimin her aşamasında büyük bir “sabırla” tüm ayrıntıları gözden geçiren ve bana her konuda sonsuz destek veren sevgili danışman Hocam Prof. Dr. Tevfik AYAN’a teşekkür etmek istiyorum. Kendisi birçok konuda sahipsiz olmadığımı her zaman hissettirmiş ve özel problemlerimle de ilgilenerek zor günlerimde bana moral vermiştir. Tez izleme jürisi üyeleri Prof. Dr. Hüseyin DEMİREL ve Prof Dr. Rasim DENİZ’e yönlendirmelerinden dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca Doktora Tez Jürisi üyesi Doç. Dr. Semih ERGINTAV’a çalışmaya, eleştirileriyle yaptığı katkı için içten teşekkürler. MIT’den Dr. Bob KING’e GAMIT/GLOBK konusunda yardımlarından ötürü teşekkür ederim. Dr. KING, yazılan elektronik postalara belki de en hızlı cevap veren insanlardan biridir. GPS verilerini internet üzerinden ücretsiz olarak kullanıcılara sunan International GPS Service (IGS)’e ve bu kuruluşa katkı veren bütün herkese ayrıca teşekkür ederim.

Halen çalışmakta olduğum Zonguldak Karaelmas Üniversitesi (ZKÜ) Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölüm Başkanı Hocam Prof. Dr. Şenol KUŞÇU’ya rahat bir çalışma ortamı sağladığı için teşekkür ederim. Prof. Dr. Erdal KOÇAK, ZKÜ’de çalıştığım süre boyunca birçok özel problemimde bana destek olduğundan kendisine minnettarım. Çalışma arkadaşlarımdan Öğr. Gör. Hakan ŞAHİN ve Araş. Gör. Serkan KARAKIŞ bölümde üzerime düşen bazı sorumlulukları büyük bir iyi niyetle omuzlamışlar ve dolaylı olarak çalışmalarımda bana destek olmuşlardır. Araş. Gör. Serkan KARAKIŞ ayrıca, tezde geçen hesaplamalar için kendi kişisel bilgisayarını belirli bir süre benim kullanımına sunmuş ve işlerimi oldukça kolaylamıştır. Uzm. Murat ORUÇ, kişisel bilgisayarını tezi yazabilmem için adıma tahsis etmiş ve ailesini uzun bir süre bilgisayarsız bırakmıştır. Arkadaşlarım Hakan ŞAHİN, Murat ARSLANOĞLU, Murat ORUÇ, Serkan KARAKIŞ ve Hüseyin TOPAN’a, Zonguldak’ta yaşadığım zorlukları aşmamda bana büyük destek oldukları için teşekkür etmek istiyorum. İTÜ’den Doç. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK’e ve Araştırma Görevlileri Dr. Tevfik ÖZLÜDEMİR, Caner GÜNEY, Orhan AKYILMAZ, Bihter ÖZÖNER EROL ve Serdar EROL’a konukseverlikleri ve bütün yardımları için teşekkür ederim.

Doktora eğitimim boyunca kendilerini ihmal ettiğim Anne ve Babama, çocukluğumdan beri verdikleri her katkı için sonsuz teşekkürler. Zamansız kaybettiğim Babam Ekrem IŞIKLAR, büyük hayat tecrübesiyle bana her zaman yol göstermiştir. Kendisi ve eşi Annem Nezahat IŞIKLAR desteklerini hiç esirgememişler, İstanbul’a gidişlerimde bana sıcak bir yuva sunmuşlar, eşimi hiçbir zaman yalnız bırakmayarak benim bu çalışmaya yoğunlaşmam için en büyük katkıyı vermişler, yerine getirmem gereken sorumlulukları büyük bir özveriyle üzerlerine almışlardır.

Son olarak en büyük minnettarlığım, yanında olmam gereken zamanlarda olamadığım eşim Müge IŞIKLAR’dır. Hayatta her şeyin olumlu yanını görmeyi ve küçük şeylerden mutlu olmasını bilmeyi kendisinden öğrendiğim Müge’nin desteği olmaksızın bu çalışmayı bitirmem mümkün değildi.

Temmuz 2004

Mehmet Güven KOÇAK

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı	2
1.2. Çalışmanın Akışı	3
2. KOORDİNAT SİSTEMLERİ	5
2.1. Göksel Koordinat Sistemleri	6
2.1.1. Presesyon ve Nutasyon	6
2.1.2. CCRS (Conventional Celestial Reference System)	7
2.2. Yersel Referans Sistemleri	8
2.2.1. Kutup Hareketi	8
2.2.2. CTRS (Conventional Terrestrial Reference System)	9
2.3. Referans Sistemlerinin Gerçekleştirilmesi	10
2.3.1. Ölçme Yöntemleri	10
2.3.2. ICRF (International Celestial Reference Frame)	11
2.3.3. ITRF (International Terrestrial Reference Frame)	13
2.4. ICRF ve ITRF Arasında Dönüşüm	14
3. GPS ÖLÇÜLERİNİN MODELLENMESİ	17
3.1. Genel Bilgiler	17
3.2. GPS Sinyal Yapısı	19
3.2.1. GPS Kod Gözlemleri	20
3.2.2. GPS Faz Gözlemleri	22
3.3. Faz Gözlemlerinin Lineer Kombinasyonları	23
3.3.1. Aynı Tür Faz Gözlemleri Arasındaki Kombinasyonlar	23
3.3.2. Farklı Tür Faz Gözlemleri Arasındaki Kombinasyonlar	25
3.4. Troposferik Gecikme	28
3.5. Parametre Tahmini	29
4. UYDULARIN ve YER İSTASYONLARININ ZAMANA BAĞLI HAREKETLERİ	32
4.1. GPS Uydu Yörünge Modellenmesi	32

4.1.1. Yerin Çekim Alanı	33
4.1.2. Uyduya Ayın ve Güneşin Doğrudan Çekim Etkisi	35
4.1.3. Güneş Radyasyon Basıncı	35
4.1.4. Yeryuvarı Gravite Alanına Gel-Git Etkisi	36
4.2. Uydu Yörüngelerinin İntegrasyonu	37
4.2.1. Uydu Yörünge Hareketinin Lineerleştirilmesi	37
4.2.2. Nümerik İntegrasyon	38
4.3. Yer Noktalarının Hareketlerinin Modellenmesi	40
4.3.1. Gel-Git Düzeltmesi	40
4.3.2. Levha Tektoniği ve NUVEL-1A Modeli	41
5. FREKANS ve ZAMAN-FREKANS ANALİZİ	43
5.1. Fourier Dönüşümü	43
5.1.1. Sinyallerin Örneklenmesi	47
5.1.2. Evrişim	47
5.1.3. Korelasyon Teoremi	49
5.1.4. Süzgeçleme	49
5.1.5. Eşit Aralıklı ve Ardışık Olmayan Serilerde Güç Spektrumu (Lomb-Scargle Periodogramı)	51
5.2. Zaman-Frekans Analizi	54
5.2.1. Sürekli Wavelet Dönüşümü	57
5.2.2. Ayırık (Diskret) Wavelet Dönüşümü	59
6. GPS ZAMAN SERİLERİNİN ANALİZ UYGULAMALARI	65
6.1. Uygulama Ağı ve Gözlemleri	65
6.2. GPS Zaman Serilerinin Elde Edilmesi	71
6.2.1. Uygulama Ağının Hesabı	71
6.2.2. Kısa Dönemli (Günlük) Doğruluklar	72
6.2.3. Farklı Serbest Ağ Çözümlerinin Birleştirilmesi ve Datum Belirleme	75
6.2.4. Hesaplama Zamanı	80
6.3. Zaman Uzayında Analiz	81
6.3.1. Zaman Serilerinin Lineer Regresyonu	81
6.3.2. Lineer Regresyon Sonuçlarının Karşılaştırılması	86
6.4. Frekans Uzayında Analiz	96
6.5. Zaman-Frekans Uzayında Analiz	110
7. SONUÇ	119
KAYNAKLAR	123
EKLER	130
ÖZGEÇMİŞ	137

KISALTMALAR

GPS	: Global Positioning System
VLBI	: Very Long Baseline Interferometry
SLR	: Satellite Laser Ranging
LLR	: Lunar Laser Ranging
DORIS	: Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
IGS	: International GPS Service
BKG	: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
GAMIT	: GPS At MIT
CCRS	: Conventional Celestial Reference System
CTRS	: Conventional Terrestrial Reference System
IERS	: International Earth Rotation Service
UT	: Universal Time
UTC	: Universal Time Coordinated
CIO	: Conventional International Origin
GRS	: Geodetic Reference System
ICRF	: International Celestial Reference Frame
ITRF	: International Terrestrial Reference Frame
PRN	: Pseudo Random Noise
LOD	: Length Of Day
JPL	: Jet Propulsion Laboratory
GST	: Greenwich Sidereal Time
GMST	: Greenwich Mean Sidereal Time
IAU	: International Astronomical Union
FOC	: Full Operational Capability
DMA	: Defense Mapping Agency
NIMA	: National Imagery and Mapping Agency
WVR	: Water Vapor Radiometer
WGS84	: World Geodetic System 1984
ED50	: European Datum 1950
JGM	: Joint Gravity Model
EGM96	: Earth Gravitational Model 1996
CHAMP	: Challenging Minisatellite Payload
GRACE	: Gravity Recovery and Climate Experiment
GOCE	: Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer
SST	: Satellite-to-Satellite Tracking
CODE	: Center for Orbit Determination in Europe
FFT	: Fast Fourier Transform
GLONASS	: Global Navigation Satellite System
SOPAC	: Scripps Orbit and Permanent Array Center
RINEX	: Receiver Independent Exchange
SINEX	: Software Independent Exchange

NS : North-South
EW : East-West
MIT : Massachusetts Institute of Technology



TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 Değişik ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması.....	11
Tablo 3.1 GPS’de kullanılan dalgalar.....	19
Tablo 4.1 İki uydu için harmonik katsayıların uydu ivmesine etkisi.....	37
Tablo 6.1 Uygulamada kullanılan ağ için seçilen istasyonlara ait bilgiler.....	70
Tablo 6.2 Uygulama ağının veri boyutu.....	70
Tablo 6.3 Değişik çözümler ve stratejileri.....	80
Tablo 6.4 5 farklı ağ çözümüne ait çözüm dosyaları (h-dosyası) boyutu.....	81
Tablo 6.5 Uygulama ağında farklı çözümlerden elde edilen konum bileşenlerinin karşılaştırılması.....	86
Tablo 7.1 Uygulama ağında farklı çözümlerden elde edilen hız bileşenlerinin karşılaştırılması.....	120
Tablo 7.2 Wavelet dönüşümü ile süzgeçlenen zaman serilerinden hesaplanan hız bileşenleri.....	122

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	Presesyon ve nutasyon olayının oluşması..... 7
Şekil 2.2	Yerin anlık dönme ekseninin, tabanı ekliptik kutbu olan koni etrafında seküler (presesyon) ve periyodik (nutasyon) hareketi.... 7
Şekil 2.3	ICRF 'i tanımlayan 212 kuasarın Aitoff kartografik projeksiyonunda gök küredeki konumları..... 13
Şekil 2.4	ITRF2000 ağı..... 14
Şekil 3.1	İkili farkların yersel koordinat sisteminde gösterimi..... 24
Şekil 3.2	İkili farkın geometrik gösterimi..... 27
Şekil 5.1	ISTA GPS kod çözümlerinden üretilen Z bileşenleri..... 50
Şekil 5.2	25 Ağustos ve 26 Ağustos çözümlerinin maksimum korelasyon değerine göre normlandırılmış çapraz korelasyonu..... 50
Şekil 5.3	ISTA navigasyon çözümü X zaman serisi..... 52
Şekil 5.4	ISTA navigasyon çözümü X zaman serisinin frekans spektrumu 52
Şekil 5.5	PRN25 uydusunun yörünge büyük yarı eksen değişimleri..... 56
Şekil 5.6	Şekil 5.5'de verilen serilerin frekans spektrumları farkı..... 56
Şekil 5.7	Haar wavelet fonksiyonunun değişik ölçeklerde gösterimi..... 58
Şekil 5.8	Daubechies db2 ve db4 wavelet fonksiyonları..... 59
Şekil 5.9	Sinüs fonksiyonu zaman serisinin Haar wavelet dönüşümü..... 60
Şekil 5.10	PRN25 uydusunun eksentrisite zaman serisi ve 1. ölçekte detayı 64
Şekil 6.1	IGS sabit istasyonlarının yeryüzüne dağılımı..... 66
Şekil 6.2	GPS ve hassas yörünge verilerinin karşılaştırılması..... 67
Şekil 6.3	IGS sabit istasyonlarından seçilerek oluşturulan uygulama ağı (uyga ağı)..... 69
Şekil 6.4	Baz çözümü iç doğrulukları..... 72
Şekil 6.5	NS ve EW bileşenleri doğruluklarının karşılaştırılması..... 73
Şekil 6.6	ISTA, MALI ve METS istasyonlarında 2002 yılı 250. günde görülebilen tüm uyduların azimut-yükseklik değişimi..... 74
Şekil 6.7	Farklı çözümlerin birleştirilmesi grafik gösterimi..... 76
Şekil 6.8	Daynak noktalarının yeryüzüne dağılımı..... 79
Şekil 6.9	ANKR NS ve EW bileşenleri zaman serisi..... 84
Şekil 6.10	ANKR NS ve EW bileşenlerinin kaba hatalı ölçüler elimine edildikten sonraki zaman serisi..... 84
Şekil 6.11	ISTA NS bileşeni zaman serisi ve lineer regresyonu..... 85
Şekil 6.12	ISTA EW bileşeni zaman serisi ve lineer regresyonu..... 85
Şekil 6.13	ISTA EW koordinat zaman serilerinin değişik çözümlerinin sıfır çözümü ile karşılaştırılması..... 87
Şekil 6.14	İstasyonlardaki hız vektörleri..... 88
Şekil 6.15	Hız vektörlerinin güven elipsleri..... 89
Şekil 6.16	Sıfır ve 1 çözümü konum farkları ve farkların güven elipsleri..... 91

Şekil 6.17	Sıfır ve 2 çözümü hız farkları.....	92
Şekil 6.18	Sıfır ve 4 çözümü hız farkları.....	94
Şekil 6.19	Sıfır ve 5 çözümü hız farkları.....	95
Şekil 6.20	ITRF97 ve ITRF2000 hız bileşenleri farkı.....	97
Şekil 6.21	ITRF97 ve ITRF2000 NS ve EW bileşenleri hız farkları.....	97
Şekil 6.22	JPL ve bu çalışmada bulunan hız bileşenleri farkı.....	98
Şekil 6.23	JPL ve bu çalışmada bulunan NS ve EW bileşenleri hız farkları.....	98
Şekil 6.24	ISTA zaman serileri güç spektrumu.....	99
Şekil 6.25	ISTA NS bileşeni zaman serisi ve lineer regresyona yıllık ve yarı-yıllık genliklerin dahil edilmesiyle bulunan çözüm.....	100
Şekil 6.26	ISTA EW bileşeni zaman serisi ve lineer regresyona yıllık ve yarı-yıllık genliklerin dahil edilmesiyle bulunan çözüm.....	100
Şekil 6.27	Yarı-yıllık ve yıllık genlik bileşenleri.....	101
Şekil 6.28	Lineer ve genişletilmiş regresyon ile bulunan hızların karşılaştırılması.....	102
Şekil 6.29	TRAB zaman serilerinin 1 gün örnekleme aralıklı lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu...	103
Şekil 6.30	TRAB EW bileşeni zaman serisinin maksimum korelasyon değerine göre normlandırılmış otokorelasyonu.....	103
Şekil 6.31	Şekil 6.30'un aynısı ancak ilk 30 günlük değişim	104
Şekil 6.32	TRAB zaman serilerinin 2 gün örnekleme aralıklı lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu...	105
Şekil 6.33	TRAB zaman serilerinin 7 gün örnekleme aralıklı lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu...	105
Şekil 6.34	TRAB zaman serilerinin 14 gün örnekleme aralıklı lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu...	105
Şekil 6.35	TRAB zaman serilerinin 7 gün örnekleme aralıklı yıllık ve yarı-yıllık genlik değerlerinin de kestirildiği lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu.....	106
Şekil 6.36	TRAB EW bileşeni zaman serisi doğruluğunun farklı örnekleme aralıkları için değişimi.....	107
Şekil 6.37	TRAB EW bileşeni hızının farklı örnekleme aralıkları için değişimi.....	107
Şekil 6.38	TRAB EW bileşeni hız doğruluğunun farklı örnekleme aralıkları için değişimi.....	108
Şekil 6.39	WTZR EW bileşeni hız doğruluğunun farklı örnekleme aralıkları için değişimi.....	108
Şekil 6.40	Örnekleme aralığı 7 gün alınarak bulunan hız doğruluklarının 1 gün örnekleme aralığı ile bulunan doğruluklara oranı.....	109
Şekil 6.41	Örnekleme aralığı 14 gün alınarak bulunan hız doğruluklarının 1 gün örnekleme aralığı ile bulunan doğruluklara oranı.....	109
Şekil 6.42	Örnekleme aralığı 21 gün alınarak bulunan hız doğruluklarının 1 gün örnekleme aralığı ile bulunan doğruluklara oranı.....	109
Şekil 6.43	TUBI istasyonu koordinat zaman serisi ve bunların 'db4' wavelet dönüşümü.....	111
Şekil 6.44	TUBI NS bileşeni zaman serisinin 'db4' wavelet ile elde edilen detay ve serinin değişik ölçeklerde süzgeçlenmiş durumu.....	114
Şekil 6.45	TUBI NS bileşeni zaman serisinin değişik yöntemlerle süzgeçlenmiş durumu.....	115

Şekil 6.46	TUBI EW bileşeni zaman serisinin db4 ile süzgeçlenmiş durumu.....	115
Şekil 6.47	SFER NS bileşeni zaman serisinin ‘db4’ wavelet ile elde edilen detay ve serinin değişik ölçeklerde süzgeçlenmiş durumu.....	117
Şekil 6.48	TRAB NS bileşeni zaman serisinin lineer regresyon ve wavelet ile bulunan 6. ölçekte süzgeçlenmiş durumlarının karşılaştırılması.....	118
Şekil A.1	igs1 ağı noktaları.....	131
Şekil A.2	igs2 ağı noktaları.....	132
Şekil A.3	igs3 ağı noktaları.....	133
Şekil A.4	eura ağı noktaları.....	134
Şekil A.5	WTZR EW bileşeni zaman serisinin otokorelasyonu.....	135
Şekil A.6	WTZR zaman serilerinin 1 gün örnekleme aralıklı genişletilmiş lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu.....	135
Şekil A.7	WTZR zaman serilerinin 7 gün örnekleme aralıklı genişletilmiş lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu.....	136
Şekil A.8	WTZR zaman serilerinin 14 gün örnekleme aralıklı genişletilmiş lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu.....	136

SEMBOL LİSTESİ

X, Y, Z	: Göksel veya yersel sistemde koordinat bileşenleri
α, δ	: Rektasansiyon ve deklinasyon
r, θ, λ	: Küresel kutupsal koordinatlar
R_1, R_2, R_3	: Dönme matrisleri
ρ	: Toposentrik uzunluk
c	: Işık hızı
t	: Zaman
φ	: Faz gözlemi
Φ	: Ölçekli faz gözlemi
D	: İkili fark operatörü
N_1	: Narrow lane tamsayı belirsizliği
N_2-N_1	: Wide lane tamsayı belirsizliği
P	: Ağırlık matrisi
$x(t)$	: Zaman serisi
$X(f)$	: $x(t)$ zaman serisinin frekans ortamı gösterimi
a_k, b_k	: Fourier katsayıları
$P(f)$	: Güç spektrumu
$W_\psi x(\cdot)$	: $x(t)$ zaman serisinin Wavelet dönüşümü
ψ	: Wavelet fonksiyonu
I	: Gözlemler vektörü
v	: Düzeltme vektörü
x	: Bilinmeyenler vektörü
A	: Katsayılar matrisi
Q	: Kofaktörler matrisi
Σ	: Varyans-kovaryans matrisi
a, b	: Regresyon parametreleri
f_s	: Örnekleme frekans aralığı
α	: Spektral indeks

GPS SABİT İSTASYONLARINDA ZAMAN SERİLERİ ANALİZİ

ÖZET

Global Positioning System (GPS), 1980'li yıllardan beri jeodezik amaçlarla kullanılan, başlangıçta Amerikan savunma ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla tasarlanmış bir konumlama sistemidir. Sistem, aktif olarak ölçme dalgaları yayan uydulardan oluşmakta ve kullanıcılar, konumlarını bir referans sisteminde belirleyebilmektedir. Konum belirleme bağımsız, tek bir alıcının verileriyle yapılabileceği gibi birden fazla alıcı ile de yapılabilir. İlkinde mutlak konumlamadan bahsedilir ve bu yöntemle birkaç m mertebesinde doğruluklara ulaşmak mümkündür. Jeodezi ve yer bilimleri ile uğraşanlar için ise birden fazla alıcının kullanıldığı bağıl konumlama, ulaşılan daha yüksek doğruluklar nedeniyle daha önemli olmuştur. Bağıl konumlama ile ilk kuşak pahalı anten ve alıcıların kullanıldığı ve uydu sayısının henüz onlu sayılara ulaşmadığı 1980'lerde dm ve cm doğruluklara ulaşmak mümkündü. Bu doğruluklar bile o zamanlar bir devrim etkisi yaratmıştır. Keza GPS, triyagülasyon, trilaterasyon gibi metotlarda noktaların birbirlerini görme şartını ortadan kaldırıyordu. Bir başka devrim, her hava koşulunda ölçüm yapmanın mümkün olmasıydı.

1990'lı yılların ortasına kadar GPS'in hem uzay hem de kullanıcı biriminde gelişmeler olmuştur. Uzay bölümüne yeni uydular eklenmiş, hatta dinamik olarak daha stabil yeni model uydular üretilerek devreye sokulmuştur. Alıcı ve anten teknolojisi ise GPS ile ölçmelerde en büyük hata kaynaklarından olan çok yolluluğu azaltma trendine girmiş ve fiyatları da daha makul seviyelere gelmiştir. 1994 yılında tam operasyonelliğinin ilanı ile GPS rutin bir sistem olarak kullanılır hale gelmiştir. GPS yalnızca lokal çalışmalarda değil, yerbilimlerini ilgilendiren bölgesel ve küresel ölçeklerde de kullanılmaya başlamıştır. Yerbilimcilerin özellikle uzun bazlı analizlerini yapabilmeleri için gerekli, GPS'in kendi yörünge bilgisi yeterli olmadığından yeryüzüne dağılmış istasyonlar yardımıyla hesaplanan yörünge verilerinin kullanılmasının doğruluğu artırıcı etkisi olduğu görülerek International GPS Service (IGS) hayata geçirilmiştir. Deneme aşamalarından sonra 1994 yılından itibaren IGS, kullanıcılarına yalnızca hassas yörünge verisi sunmayıp sabit istasyonlarda toplanan gözlem verileri, meteorolojik ölçmeler, iyonosferi ve troposferi ilgilendiren veriler, yer dönme parametreleri gibi ürünlerini rutin bir şekilde sunmaktadır.

IGS'in operasyonel hale gelmesi ile kuruluşu, sayısı her geçen gün artmakta olan istasyonların eklenmesi uzaysal çözünürlüğü ve bu istasyonların yıllar boyunca sürekli veri toplaması ise tektonik hareketlerin yorumlanmasına yardımcı olan frekans (zaman) çözünürlüğünü artırmıştır. IGS'e bağlı GPS sabit istasyonlarında en eskisi 12 yıldan beri olmak üzere günlük gözlemler kaydedilmektedir. Günlük GPS verilerinin değerlendirilmesiyle elde edilen çözümlerin zamana karşı değişimleri, bu

istasyonlara ait koordinat zaman serilerini oluşturmaktadır. GPS zaman serilerinin değerlendirilmesiyle şimdiye kadar ortaya konamayan periyodik değişimler incelenebilmekte, örnek olarak mevsimsel değişimler, depremler sonucu oluşan ani değişimler ile post-sismik hareketler kolaylıkla belirlenebilmektedir. Zaman serilerinin analiziyle özelden genele doğru olmak üzere önce istasyon ve yakın çevresinin daha sonra da istasyonun bulunduğu bölgenin ve tektonik levhanın davranışı hakkında çıkarımlarda bulunulabilir. Serilerden amaçlanan bütün çıkarımların yapılabilmesi için zaman serilerinin detaylı analizi oldukça önemli olmaktadır.

Bu çalışmada, IGS'e bağlı sabit istasyonlardan Anadolu ve Avrasya bloklarında bulunanları ile bunların yakın ve uzak çevresindeki 24 sabit istasyonun GPS gözlemleri, 2000.0-2003.0 yılları için değerlendirilmiştir. Bu istasyonların oluşturduğu ağın 1096 günlük çözümleri üretilmiştir. Verilerin değerlendirmesinde ikili farkları gözlem olarak kullanan GAMIT programından yararlanılmıştır. Fonksiyonel modelde istasyonların kartezyen dik koordinatları, uyduya ait 6 Kepler elemanı ile 9 adet güneş radyasyon basıncı parametreleri ve kutup hareketi parametreleri bilinmeyen alınarak kestirilmiştir. Elde edilen 24 noktalı ağ çözümü SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) tarafından üretilen 4 farklı çözümle birleştirilerek 200'e yakın noktaya sahip küresel boyutlarda homojen bir ağ elde edilmiştir. Elde edilen ağın datum tanımlaması ise Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından önerilen listeden olmak üzere sismik olarak aktif bölgeler ile aktif levha sınırlarından uzak olması, en az 3 yıldan beri veri toplaması, değerlendirme aralığında aktif olarak faaliyet göstermesi ve hareket hızının lineer olarak değişmesi gibi kriterler göz önüne alınarak seçilen 74 nokta aracılığıyla yapılmıştır. Datum tanımlaması, 1096 gün için ve ayrı ayrı olmak üzere 74 dayanak noktasının ITRF97 koordinatlarıyla birleştirme ile elde edilen küresel ağ arasında 3 boyutlu benzerlik dönüşümü yapılarak elde edilmiştir. Dönüşüm sırasında uyuşumsuz olarak elde edilen datum noktaları, söz konusu gün için dayanak noktası listesinden çıkarılmıştır. Bu şekilde elde edilen ağ, çalışmada sıfır çözümü olarak isimlendirilmiştir. Sıfır çözümüne ek olarak, 24 noktalı uygulama ağının başka çözümlerle birleştirilmediği ve datum tanımlamasının kendi içinde seçilen noktalarla yapıldığı dört farklı çözüm daha yapılmıştır. Datum tanımlaması için JPL'in dayanak noktası niteliklerine sahip 10 noktası iki çözüm için kullanılmıştır. Bu 10 noktaya ek olarak JPL listesinde olmayan dört noktanın daha dayanak noktası alındığı toplam 14 noktalı datum çözümü diğer iki çözüme ek olarak verilmiştir.

Bu çalışmada zaman serilerinin yalnızca kuzey-güney (NS) ve doğu-batı (EW) bileşenleri ile ilgilenilmiş, yükseklik bileşeni inceleme dışı tutulmuştur. Elde edilen koordinat zaman serileri önce elde edildikleri uzay olan zaman uzayında değerlendirilmiştir. Burada serilere lineer regresyon uygulanarak konum ötelemesi ve serinin eğimi ya da hız büyüklükleri En Küçük Kareler (EKK) dengelemesi ile bulunmuştur. Lineer regresyon analizinde seride bulunan kaba hatalı ve uyuşumsuz ölçüler, ölçü kümesinden çıkarılmıştır. Bunun için yinelemeli ağırlıklandırılmalı Huber kestiriminden yararlanılmıştır. Farklı fonksiyonel model ve datum çözümleri ile bulunan öteleme ve hız bileşeni değerleri, sıfır çözümü ile karşılaştırılmıştır. Seçilen datum ve fonksiyonel modelin, koordinat bilinmeyenleri zaman serisi ile bunlardan hesaplanan hız bileşenlerini etkilediği gösterilmiştir.

Zaman serileri ikinci olarak frekans uzayında incelenmiştir. İstasyonların, periyodik hareketler yaptıkları göz önüne alınarak lineer regresyon, periyodik bileşenlerle

genişletilmiştir. Genişletilmiş lineer regresyon modeliyle bulunan düzeltme değerleri ile serilerin frekans spektrumu hesaplanmış, bu spektrumun belirli bir yüksek frekans kesimi ile düşük kesimi arasında spektral indeks hesaplanmıştır. Spektral indeks, birçok nokta için -1 değerine yakın çıkmıştır. Bu değerler, serilerin tekrarlamalı sinyaller içerdiği ve ardışık çözümlerin birbirleriyle korelasyonlu olduklarını göstermektedir. Zaman serilerinin örnekleme aralığının değiştirilmesiyle spektral indeksin sıfır değerine yaklaştığı, yani spektrumun yatay seyir izlediği gösterilmiştir. Bu olęu, istasyonların lineer regresyonla bulunan optimistik hız değerlerinin daha gerçekçi kestirimi için kullanılmıştır. Önerilen metod, GPS zaman serilerinin hesaplanmasında kullanılan maksimum olabilirlik kestirimi ve Allan standart sapma hesabı yöntemlerine alternatif olarak sunulmuştur.

Son olarak zaman serileri zaman-frekans uzayında incelenmiştir. Burada post-sismik harekete maruz kalan bir istasyon seçilerek zaman serileriyle bulunan yüksek frekanslı değişim gösteren istasyonun hareketinin szgelenerek arzu edilen ölçekte düşük frekanslı genel hareketi çıkarılmıştır. Böylece post-sismik etki altındaki istasyonun zaman serisinin istenen bölgedeki hızı kestirilebilmiştir. Wavelet analizinin, zaman serilerinde ani konum değişimlerini lokalize etmede de kullanılabileceği gsterilmiştir.



TIME SERIES ANALYSIS AT GPS PERMANENT STATIONS

SUMMARY

Global Positioning System (GPS) is a positioning system, which was initially designed for American military purposes but also has been used for geodetic purposes since the 1980s. The system is made up of satellites, which steadily broadcast signals. Users can determine their position in a coordinate frame. Positioning can be achieved either via the data of an independent, single receiver or of multiple receivers. The former method is called absolute positioning and it is possible to reach accuracy in a few m degrees with this method. Geodesists and other earth scientists use merely the latter one, the relative positioning method, since it helps to reach high accuracies. Though the satellite configuration was sparse at its early stage, it was still possible to obtain dm or even cm accuracies using expensive receivers. Such accuracies had then made revolutionary effect on data collection. GPS brought an end to the condition that sites are to be intervisible. All-weather observations were hereafter possible as well.

There was an ongoing development in both space and user segments of GPS in the mid-1990s. New satellites have been added to the system and dynamically stable new generation satellites were produced and utilized. Antenna and receiver technology inclined to reduce the most critical error source, multipath, and their prices declined to reasonable levels. After the full operational capability declaration in 1994 GPS has become to be a common system. Users have been utilizing GPS not only for local applications but also for regional and global earth-science applications from then on. International GPS Service (IGS) was initiated in 1992 in order to process GPS data over long baselines using orbit information attained from globally distributed points due to insufficient broadcast ephemeris accuracy of GPS. After the test phase IGS has been active since 1994 and it doesn't only serve to user community high-precision orbit information but also GPS and digital meteorological data at permanent stations, ionospheric and tropospheric data and earth rotation parameters routinely.

Spatial resolution as well as temporal resolution has been increasing with increasing number of stations and data accumulation. Temporal resolution improves the interpretation of tectonic movements. Daily GPS data have been recorded at permanent stations for over 12 years. Processing daily data of these stations forms coordinate time series of them. Analysis of GPS time series enables to extract periodic, seasonal, abrupt changes due to earthquake, and post-seismic movements. The analysis also helps to understand the motion of the station and its close vicinity, and of the tectonic plate on which the station is lying. Detailed analysis of the time series has been crucial in order to infer significant information.

In this study, GPS data of 24 IGS permanent stations lying on the Anatolian and Eurasian and the neighboring plates in the close and far vicinity of Anatolia have been processed. The time period covers three years from 2000.0 to 2003.0. Data of 1096 days are processed. GAMIT program system is used to process doubly differenced phase observations. Functional parameters are station coordinate values, 6 Kepler elements and 9 solar radiation pressure coefficients for each satellite, and polar motion parameters. A homogeneous network of nearly 200 stations has been obtained merging with 4 different solutions produced by Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC). Datum of the network has been fixed via stations-list delivered from Jet Propulsion Laboratory (JPL). 74 datum points are selected according to the criteria that the site is far from seismic and tectonically active zones, the site has been collecting data for at least three years, the site is active during the processing period and its velocity changes only linearly. Datum fixing is achieved by realizing similarity transformation between stations' ITRF97 and combined solution coordinate values. At the transformation step disagreeing datum points are removed from the datum points list for that particular day. The network obtained in this way is called zero-solution in this study. Four different solutions have also been produced in addition to the zero-solution. 10 points in JPL list existing in 24-point network define datum and are utilized for the first two solutions. The remaining two solutions are based on 14 datum points using 4 more points (which do not exist in JPL list) in addition to 10 datum points.

Only NS and EW components of the station coordinate time series are anticipated in this study. The height component is not included in the analysis. Time series are first analyzed in the time domain. Here offset and velocity values are estimated from the series using least squares linear regression. Blunders in the series are removed by Huber robust estimation. Different functional and datum solutions are compared to the base zero-solution. It displays that the choice of both datum and functional model have an affect on coordinate time series and velocity estimations from them.

Second analysis of time series is in the frequency domain. Taking into account that stations undergo periodic motions, linear regression is augmented by periodic components. Residuals are used to compute the power spectrum after augmented linear regression. Spectral index values are estimated from the spectra. Spectral indices are found to be close to -1 for many values. This confirms that the adjacent solutions consist of repeated signals and are also correlated. Spectral indices fluctuate about zero with increasing sampling interval. This fact has been exploited in order to infer optimistic velocity uncertainty values. The proposed method is an alternative to realistic uncertainty values estimation by maximum-likelihood and Allan variance methods.

Last analysis is made in time-frequency domain. A station exposed to post-seismic deformation is chosen and its high frequency time series is filtered by multi-resolution methods, and low frequency motion of the station is extracted. Segmentation of the time series is thus avoided with the help of wavelet analysis. It is also shown that wavelet analysis is a powerful tool for the determination of abrupt changes.

1. GİRİŞ

Uydu teknolojilerinin gelişmeye başladığı 1960'lı yıllardan bu yana çeşitli uydu misyonları birçok amaca hizmet etmek üzere kullanılmıştır. Bu misyonlar özellikle yerbilimlerini oldukça etkilemiş ve çoğu bilim dalında bu gelişim doğrultusunda yeni oluşumlar gözlenmiştir. Bu gelişimin en önemli yararlarından biri, karmaşık bir sistem olan yeryuvarının anlaşılmasına yönelik katkılar sağlamış olmasıdır. Uydu misyonlarından belki de yerbilimleri açısından en önemlisi Amerikan Savunma Bakanlığı tarafından geliştirilen GPS (Global Positioning System)'dir. GPS ile bir noktadaki mutlak konum 6-7 m doğrulukla rutin bir şekilde belirlenebilir. Böyle bir doğruluk ile açık denizde ve havada navigasyon problemleri büyük oranda çözülebilir. GPS ile mutlak konum belirlemeden farklı olarak bağıl konum belirleme ile mm hatta mm altı doğruluklara ulaşmak mümkündür. Bu olanak jeodezi bilimi için yeni bir başlangıç olmaya yeterli gözükmektedir. Özellikle deformasyon analizi çalışmalarında uzun ve zahmetli arazi çalışmaları azalmış, daha önceleri günlerce hatta haftalarca süren gözlemler artık kısa sürede elde edilebilir olmuştur. GPS'den önce yersel metodlarla çözülemeyen bölgesel ve küresel ölçekteki problemler, 70'li yıllardan itibaren gelişmeye başlayan VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging) gibi GPS'e nazaran daha eski sistemler ile rahatlıkla çözülebilmekteydi. Ancak bu sistemlerin en büyük problemi işletilmelerinin güç ve pahalı olmasıydı. Bu problemler bugün için de tam olarak ortadan kaldırılabilmiş değildir. GPS sisteminde son 10 yılda sisteme dahil edilen uydu sayısındaki artış ve alıcı teknolojisindeki gelişmeler ile değerlendirme tekniklerinin gelişmesi, bu sistemi bölgesel ve küresel ölçekteki tektonik hareketlerin incelenmesi gibi çalışmalarda yukarıda isimleri verilen sistemlere bir alternatif ya da bütünleyici bir sistem olarak ortaya çıkarmıştır. GPS ile yukarıda anılan problemlerin çözümü için 90'lı yılların ortasına kadar seçilen istasyonlarda belirli aralıklarla gözlemler yapılarak bu gözlemlerin değerlendirilmesi yoluna gidilmiştir. 6 ay, 1 yıl gibi seçilen aralıklarda düzenlenen kampanya ölçmeleri hız bileşenlerini elde etmede kullanılmıştır. Ancak buradan elde edilen hız bileşenlerinin doğrulukları daha az ve güvenilirlikleri de

düşüktü. Sabit istasyon kavramının ortaya çıkması ve bu istasyonların sayıca artması ile elde edilen zaman serilerinden bulunan hız büyüklüğü doğruluk ve güvenilirliğini olumlu yönde etkilemiştir. 1994 yılından itibaren IGS (International GPS Service)'in operasyonel hale gelmesi ile kuruluşa, sayısı her geçen gün artmakta olan istasyonların eklenmesi uzaysal çözünürlüğü ve bu istasyonların yıllar boyunca sürekli veri toplaması ise tektonik hareketlerin yorumlanmasına yardımcı olan frekans (zaman) çözünürlüğünü artırmıştır.

IGS'e bağlı GPS sabit istasyonlarında en eskisi 12 yıldan beri olmak üzere günlük gözlemler kaydedilmektedir. Günlük GPS verilerinin değerlendirilmesiyle elde edilen çözümlerin zamana karşı değişimleri, bu istasyonlara ait koordinat zaman serilerini oluşturmaktadır. GPS zaman serilerinin değerlendirilmesiyle şimdiye kadar ortaya konamayan periyodik değişimler incelenebilmektedir. Örnek olarak mevsimsel değişimler, depremler sonucu oluşan ani değişimler ile post-sismik hareketler kolaylıkla belirlenebilmektedir (van Dam ve diğ., 2001; Blewitt ve diğ., 2001). Bu tür bilgiler özelden genele doğru olmak üzere önce istasyon ve yakın çevresinin daha sonra da istasyonun bulunduğu bölgenin ve tektonik levhanın davranışı hakkında çıkarımlarda kullanılabilir.

1.1 Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı GPS zaman serilerinden lineer regresyonla bulunan IGS sürekli kayıt istasyonları ile temsil edilen yeryüzü noktalarının hareketlerinin hız doğruluklarının gerçekçi kestirimi için herhangi bir kabule dayanmayan alternatif ve pratik bir yöntem önermektir. Ayrıca nokta koordinatlarının ve bunlarının hareket hızlarının doğruluğunu etkileyen etkenler arasında yer alan ağ konfigürasyonu ve datum kavramlarının etkinlikleri incelenecek, sayısal örnekler ortaya konacaktır. Zaman serilerinin lineer regresyonla modellenmesine alternatif bir model olarak wavelet dönüşümü ve onun uygulamaları sunulacaktır.

Tezde Anadolu bloğu ve yakın çevresinde bulunan dört IGS noktası ile bunu 3500 km uzaklığa kadar çevreleyen 13 sayıda IGS noktası ve maksimum 8000 km uzaklıkta bulunan 7 çerçeve noktadan oluşan bir ağ tasarlanmıştır. Bu ağın farklı datum ve fonksiyonel model ile değerlendirilerek, nokta koordinatları üzerine datum

ve konfigürasyon etkisi incelenmiştir. Ağ noktalarının üç yıl süre ile gerçekleştirilen sinyal kayıtlarının günlük değerlendirilmesi ile elde edilen nokta koordinatlarından oluşturulan zaman serilerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Zaman serilerinin değerlendirilmesinde 3 farklı bakış açısı ele alınacaktır. İlk olarak zaman serileri, elde edildiği uzay olan zaman uzayında analiz edilebilir. Bu, zaman serilerinin lineer regresyonu olarak da isimlendirilebilir. İkinci olarak zaman serilerinin frekans uzayında analizi ele alınmaktadır. Burada serilerin Fourier spektrumu oluşturulmuştur. Son olarak ayrı ayrı ele alınan zaman uzayı ve frekans uzayı kavramlarının aksine her iki uzayda yani zaman-frekans uzayında serilerin analizi yapılmaktadır.

Çalışma için IGS sabit istasyonlarının bir kısmında toplanan GPS gözlem verilerinden yararlanılacaktır. Bu gözlem verileri tüm kullanıcılara açık olup IGS'in veri merkezlerinden ulaşılabilir. Gözlemlerin değerlendirilmesinde GAMIT yazılımı ile farklı çözümlerin birleştirilmesinde GLOBK yazılımlarından yararlanılmaktadır. Zaman serilerinin lineer regresyonu ile serilerin frekans spektrumu ve wavelet analizi için bu çalışma kapsamında yazılan MATLAB makrolarından yararlanılmaktadır.

1.2 Çalışmanın Akışı

Çalışmada GPS'in temeli olan koordinat sistemleri ve bu sistemlerin gerçekleştirilmiş hali olan referans ağları açıklanacak daha sonra GPS ve gözlem büyüklükleri olan GPS alıcılarında kod gözlemlerine nazaran daha doğruluklu olarak ölçülebilen faz gözlemlerinin orta ve uzun bazlarda modellenmesi özetlenecektir. Bu kapsamda parametre kestirimi sırasında fonksiyonel olarak alınabilen uydu parametrelerinin yerin çekim alanında hareket eden uydular için neler olabileceği ile deterministik kabul edilen, istasyonların çeşitli hareketlerinin modellenmesi hakkında özet açıklamalar da yer alacaktır. Çalışmanın ilerleyen bölümlerinde zaman serilerinin genlik veya güç spektrumlarının hesaplanmasında verilerin kesikli olup olmamasına göre Fourier ve Lomb-Scargle Periodogramı yöntemleri ele alınacak, serilerin hem zaman ve hem de frekans uzayında incelenmesine olanak veren sürekli ve ayrık formda Wavelet dönüşümü hakkında açıklamalar yapılarak örnekler verilecektir. Daha sonra IGS sabit istasyonlarından Anadolu bloğunun yakın ve uzak

evresindeki noktalardan seçilecek 24 nokta ile oluşturulan ağda bu noktalara ait GPS gözlemleri değerlendirilecektir. Bu blok ve çevresindeki en yeni istasyon olan ISTA (İstanbul) 1999 yılının son aylarından beri faaliyet gösterdiğinden, değerlendirmelerin 2000, 2001 ve 2002 olmak üzere 3 yıllık bir süre ile sınırlandırılması öngörülmüştür. Bu ağa ait üzümlerin çeşitli üzümlerle kombinasyonu sonucunda istasyonların zaman serileri elde edilecek ve bu serilerin sırasıyla zaman, frekans ve zaman-frekans uzaylarında çeşitli incelemeleri yapılacaktır. Özellikle serilerin güç spektrumu ve wavelet analizi kullanılarak GPS zaman serilerinden doğruluk analizi için alternatif bir yöntem nerisi geliştirilecektir. Son bölüm tezin ana sonucunu zet olarak vermesi yanında zaman serileriyle gelecekte yapılacak muhtemel çalışmalar için de öneriler içermektedir.



2. KOORDİNAT SİSTEMLERİ

Yeryuvarının ölçülmesi ve onun atmosferle arakesitinin belirlenmesi için belirli bir koordinat sistemine gereksinim vardır. Yerküre ve onun oluşturduğu çekim alanı sürekli hareket halinde ve dolayısıyla değişim içinde olduğundan durağanlığı içeren yukarıda ifade edilen yeryüzü noktalarının belirlenmesi tanımı, koordinat sistemi tanımı da içine katılarak genişletilmelidir. Buna göre artık bir koordinat sisteminin tanımı, sistemin yalnızca başlangıç noktası, eksenlerinin yönü ve birincil ve ikincil eksenlerinin seçilmesiyle oluşturulmayacaktır. Koordinat sisteminde temsil edilen noktaların koordinat bileşenlerinin zamana bağlı değişimini içeren ek parametre vektörünün de birlikte verilmesi gerekecektir. Yalnızca yerin merkezini başlangıç alan sistemlerde değil bu sistemin bağlı olduğu üst sistemlerde de zamana karşı seküler ve periyodik değişimler söz konusudur.

Jeodezide kullanılan koordinat sistemlerinin, uydu jeodezisindeki gelişmelerle önemleri daha da artmış, başlangıçta deneysel olan ölçme sistemlerinin operasyonel duruma gelmesiyle gerçekleştirilmeleri daha hızlı ve yüksek doğrulukla yapılabilir olmuştur. Yeni yöntemlerin ve ölçme sistemlerinin gelişmesi ve kullanıma sunulması, belirli bir dereceye kadar doğruluk artışı da beraberinde getirdiğinden günün koşullarına uygun yeni tanımlamaları da gerekli kılmıştır. Örnek olarak gök koordinat sistemlerinin tanımlanmasında başlangıçta optik yöntemler kullanılmış ancak gök cisimlerinin hareketlerini referans alan dinamik yöntemler yeterli doğruluğu vermediklerinden optik yöntemler terkedilerek kinematik yöntemlere başvurulmuştur. Göksel sistemlerle yersel sistemlerin ilişkisini kurabilmek için gerekli olan ve hala ihtiyaç duyulan ilkbahar noktasının tayini 1900-1956 yılları arasındaki güneş, gezegenler ve asteroidlere yapılan optik gözlemlerle ± 20 mas (milliarcsecond: mili yay saniyesi) doğrulukla belirlenebilmiştir (Capitaine ve diğ., 2002; Fricke, 1982; McCarthy, 1996).

Bu çalışmada yerin çekim alanında hareket eden GPS uydularından yararlanılacağı için iki tür koordinat sisteminden bahsedilecektir. Newton'un ikinci aksiyomunun

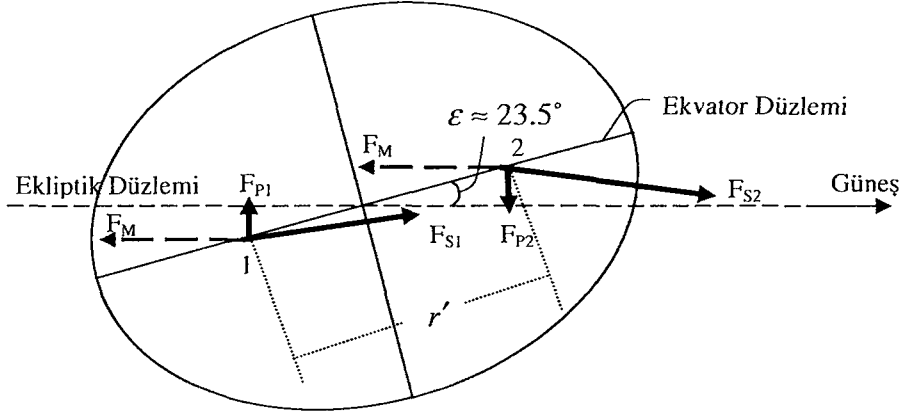
uygulanabilmesi için elde edilen uydu hareket denklemlerinin integrasyonu ancak inersiyal bir koordinat sisteminde mümkündür. Ancak içerisinde dönme hareketinin olmadığı ve ivmesiz bir koordinat sistemi tanımlı pratikte mümkün olmadığından yine pratikte yarı-inersiyal (quasi-inertial) koordinat sistemlerinden bahsedilir. Bu bakımdan yeryüzündeki konumların verildiği yerel sistemlerin aksine göksel sistemler, uydu yörünge belirleme çalışmalarında temel alınır. Gerek uydu gerekse de yer olsun güneş sistemindeki diğer cisimlerin çekim etkisindedirler. Bu yüzden gök cisimlerinin konumları da bir başka sistem olan dinamik koordinat sisteminde ifade edilir.

2.1 Göksel Referans Sistemleri

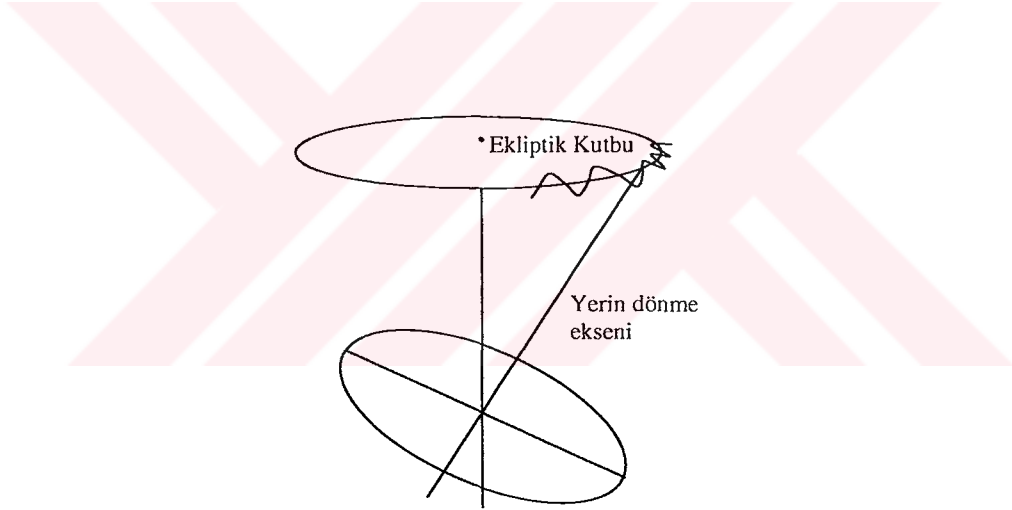
2.1.1 Presesyon ve Nutasyon

Yeryuvarı, ekvator düzlemi ile yaklaşık 23.5° 'lik bir açı teşkil eden ekliptik düzlemi içinde hareket eder. Şekil 2.1'den görüleceği gibi yerin dönme eksenini, güneşin çekim etkisiyle ekliptik düzlemine dik duruma gelmeye meyyleder. Yerin güneş etrafındaki hareketiyle oluşan ve yeryuvarının her yerinde aynı olan merkezkaç kuvveti ile yerin güneşe uzak ve yakın taraflardaki ağırlık merkezlerinin ekvator düzlemindeki r' mesafesi dolayısıyla farklı kuvvetlerle ve farklı yönlerde çekilmesi sonucunda 1 ve 2 noktalarında ve birbirlerine zıt yönde olmak üzere $\vec{F}_{P1}$ ve $\vec{F}_{P2}$ ortaya çıkar. Bu artık kuvvetler sonucunda yerin dönme eksenini, ekliptik düzlemine dik doğrultuda ekliptik kutbu etrafında bir koninin tabanında seküler ve periyodik hareketler yapar (Şekil 2.2). Benzer biçimde ayın da yer etrafındaki yörüngesinin ekliptik düzlemi ile yaptığı eğim açısı yaklaşık 5° olup ekvator düzlemi ile yaptığı eğim açısı ise 18° ila 28° arasında değişmektedir. Ay da güneş gibi yerin ekvator düzlemini kendi yörünge düzlemine getirmeye çalışan bir dönme momenti ortaya çıkarmaktadır. Güneş ve ayın birlikte etkileriyle ortaya çıkan seküler hareket, anlık kutbun ekliptik kutbu etrafında çok büyük periyotlu hareketidir ve bu periyot 26 000 yıldır. Bu harekete astronomide ay-güneş presesyonu adı verilmektedir. Presesyon hareketi sonucunda, göksel koordinat birincil ekseninin yönü olan noktası ilkbahar noktası, yılda ortalama $50''$ batıya kaymaktadır. Sözü edilen koni tabanından periyodik sapmalar ise nutasyon olarak bilinir. Genliği $9.2''$ dir ve bir tam devri 18.6 yıldır. Bu periyot, ekvator düzlemi ile ayın yörünge düzleminin kesim noktasının (düğüm noktası)

ekvator düzleminde yapmış olduğu hareketin periyodu ile aynıdır. Sonuç olarak presesyon hareketi ay, güneş ve güneş sistemindeki diğer gezegenlerin kutuplardan basık olan yeryüzüne çekim etkisiyle meydana gelirken, nutasyon esas olarak ay-dünya sisteminin oluşturduğu düğüm noktasının hareketi ile ilgilidir.



Şekil 2.1 Presesyon ve nutasyon olayının oluşması



Şekil 2.2 Yer'in anlık dönme ekseninin, tabanı ekliptik kutbu olan koni etrafında seküler (presesyon) ve periyodik (nutasyon) hareketi

2.1.2 CCRS (Conventional Celestial Reference System)

Gök koordinat sistemlerinin gerçekleştirilmesinde tanımsal olarak iki ayrı yöntem söz konusudur. Birincisi dinamik yöntemlerdir ki bugünkü anlamda modern göksel sistemlerin gerçekleştirilmesine kadar güneş sistemi içindeki gök cisimlerinin hareketleriyle tanımlanmışlardır. Diğer kinematik yöntemler ise öz hareketleri oldukça küçük ve radyo dalgaları yayan cisimlerden yararlanmak suretiyle

oluşturulmaktadır. Dinamik sistemler, doğrulukları kinematik sistemlere nazaran oldukça düşük olmasına rağmen güneş sistemindeki gezegen konumlarının ortak bir sistemde ilişkilendirilebilmesi için önemli olmaktadır.

Merkezi, güneş sisteminin kütle merkezi barisentrda olan bir koordinat sistemi, güneş sistemine göre durağan yani inersiyal bir sistemdir. Ancak yeryuvarına yakın olan uyduların hareketlerinin tanımı için jeosentrik bir koordinat sistemi daha elverişlidir. Yeryuvarının güneş etrafındaki hareketi nedeniyle durağan sayılamayan bu sisteme quasi-inersiyal sistem denir. Konvansiyonel Göksel Koordinat Sistemi (CCRS) isimli bu sistemin referans epoğu 1 Ocak 2000 UT=12^h olup başlangıcı yeryuvarının ağırlık merkezinde, Z eksen, yeryuvarı dönme eksen, kuzey gök kutbuna, X eksen ilkbahar noktasına, Y eksen gök ekvatoru düzleminde doğuya doğru ve X eksenine dik olarak yönelmiştir. Sistemde bir noktanın konumu rektesansiyon (açılım) ve deklinasyon parametre çiftiyle verilir.

2.2 Yersel Referans Sistemleri

2.2.1 Kutup Hareketi

Yer etrafında bir yörüngede dolanan uydular ile güneş sistemi ve galaksi içindeki ve dışındaki diğer nesnelerin inersiyal bir koordinat sisteminde koordinatlarının ifadesi farklı metodlarla elde edilen çözümlerin birliğinin sağlanması bakımından önemlidir. Yeryüzüne dağılmış istasyonlardan doğal ve yapay uydulara, galaksi ötesi cisimlere yapılan gözlemler, yerin zamana bağlı çeşitli deformasyonlara maruz kalması nedeniyle yine zamansal farklılıklar gösterirler. Bu yüzden yer ve yere yakın bölgeler için ayrı bir koordinat sisteminin tanımlanması ve bu sistemin de göksel sistemlere bağlanması gerekir. Bu şekilde oluşturulacak yersel referans sisteminin merkezi yerin çekim merkezinde ve eksenlerinin yönü ise keyfi olmak üzere seçilecek iki ve buna dik olarak tanımlanacak bir olmak üzere üç yön ile tanımlanır. Sistem için, göksel referans sistemlerinin aksine ölçek parametresinin de verilmesi gerekir. Ölçek belirlemesi ışık hızı sabiti değeri c ile gravitasyon sabiti G ve yerin kütlesinin M çarpımı jeosentrik sabit GM 'in birlikte verilmesi ile yerine getirilir. c ışık hızı sabiti, yersel ölçmelerle kolaylıkla belirlenebilmektedir. Jeosentrik sabit için G ve M 'in ayrı ayrı belirlenmesi değil de katsayının kendisinin bulunması yoluna gidilir. Bu şekilde

GM 'in bağıl doğruluğu daha yüksek olarak elde edilir. Jeosentrik sabitin belirlenmesi amacıyla yerin çekim alanına duyarlı olması dolayısıyla yere yakın yörüngede dolanan uydulardan yararlanılır. Örnek olarak **Dunn ve diğ. (1999)**, GM değerini yerden yaklaşık 6000 km yüksekteki yörüngede hareket eden LAGEOS uydularına yapılan SLR gözlemlerinden yararlanarak belirlemişlerdir.

Yeryuvarı içinde kütlelerin zamanla yer değiştirmesi ve atmosfer ile yer arasında sürekli enerji alış-verişi gibi nedenlerle anlık dönme eksenini de periyodik harekete yakın bir hareket yapar. Bu yer değiştirme belirli bir an için kabul edilecek ortalama kutba göre verilebilir. Bunu tanımlayan parametre çifti kutup hareketi olarak isimlendirilir. Ayrıca dönme hızının da bir göstergesi olan ve yeryuvarının kendi eksenini etrafında bir tam devir yapmasında geçen sürenin, yeryüzüne dağılmış atom saatlerinin ortalamasından farkı $UT1-UTC$ de bu iki parametreye ek olarak verilir. Kutup hareketinin ileriye yönelik bir tahmini mümkün olmayıp ölçme sistemleriyle belirlenmesi gerekir. Kutup hareketinin periyodu yaklaşık olarak 437 gündür. Buradan yerin güneş etrafında bir periyodu ile kutup hareketi 6:5 oranında rezonanslı olduğu söylenir. IERS (International Earth Rotation Service) tarafından $|UT1-UTC| \geq 0.9s$ kritik değerine ulaşması durumunda günlük yaşamda kullanılan UTC'ye 1 s düzeltme yapılarak kullanıcılara duyurulur.

2.2.2 CTRS (Conventional Terrestrial Reference System)

Konvansiyonel Yersel Referans Sistemi (CTRS)'in ağırlık merkezi, atmosferin de kütlesi dikkate alınarak yerin ağırlık merkezinde seçilir. Z eksenini, yerin ortalama dönme eksenini olarak CIO (Conventional International Origin)'ya yönelmiştir. CIO, 1900-1905 yılları arasında kutbun ortalama konumunu ifade etmektedir. Ağırlık merkezinden ortalama Greenwich meridyenine olan doğrultu, X eksenini tanımlar. Y eksenini, ortalama ekvator düzleminde doğuya doğru bir sağ el sistemi oluşturacak şekilde yönelmiştir. Sistemde noktaların konumları ya kartezyen dik koordinatlarla ya da seçilecek bir elipsoid (örn. GRS80) ile coğrafi koordinatlarla verilir (**McCarthy, 1996; McCarthy ve Petit, 2004; Kutoğlu, 2001**).

2.3 Referans Sistemlerinin Gerçekleştirilmesi

Uzayda bir cismin konumunun çeşitli parametrelerle tanımlanabilmesi için iki aşama gereklidir. İlk aşamada bir koordinat sistemi tanımına gereksinim duyulur. İkinci aşamada tanımdan pratiğe geçilir. Bu aşama sonucunda elde edilen sistem İngilizcede “frame” olarak isimlendirilir. Türkçede ise bu kelimeye karşılık olarak “sistem” ve “ağ” kelimeleri kullanılabilir (Deniz ve diğ., 2003).

2.3.1 Ölçme Yöntemleri

Referans sistemlerinin gerçekleştirilmesinde, VLBI, SLR/LLR, GPS ve DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) gibi uzay tekniklerinden yararlanılır. Bu teknoloji içinde ışınım kaynağı çok uzaktaki radyo dalgaları yayan cisimler gözlenebileceği gibi yer etrafında bir yörüngede dolanan pasif (SLR) ve aktif (GPS) yapay uydu gözlemleri söz konusu olur. Her teknolojinin belirli problemleri çözmede kendilerine özgü üstünlükleri vardır. Örnek olarak milyarlarca ışık yılı öteden yeryüzüne ulaşan ışınımı kullanan ve konum belirlemede yüksek doğruluk sağlayan VLBI ile yerin çekim alanını ilgilendiren çalışmalar yapmak mümkün değildir. Bir başka örnek ise GPS ile gök koordinat sistemlerinin yönlendirmesini yapmanın mümkün olmamasıdır. VLBI, gök koordinat sistemlerinin ya da inersiyal (pratikte yarı-inersiyal) bir sistemin oluşturulmasında öz hareketleri pratik olarak sıfır olan kuasarlara kullandığı için bu konuda biricik yöntem olurken yere yakın yörüngelerde dolanan uydulara (örnek olarak LAGEOS) yapılan SLR optik gözlemleri ile çekim alanının düşük frekanslı bileşenleri kolaylıkla belirlenebilir. Tablo 2.1’den de görüleceği üzere GPS ve DORIS gibi SLR ve VLBI’ya nazaran çok ucuz sistemler, kısa periyodlu problemlerin çözümünde tercih edilmektedir. VLBI ve SLR’in üstünlüğü uzun periyodlu ve seküler değişimlerin analizinde ortaya çıkmaktadır. Ancak işletilmeleri pahalı ve deneyim istemektedir. SLR’in VLBI’den farklı olarak laser ışınımını ölçü olarak kullandığı gözönüne alınırsa hava koşullarına bağlılık bir diğer dezavantajdır. VLBI ve SLR’in bu dezavantajları sonucu işletilmesi daha kolay olan GPS ön plana çıkmaktadır. GPS’in gelişmesinden önceki dönemlere rastlayan VLBI ve SLR ile bölgesel ve küresel ölçeklerdeki jeodinamik ve tektonik hareketleri belirleme görevini bugün GPS

almıştır. GPS ile elde edilen doğruluk VLBI ile karşılaştırılabilir ölçeklerde olup sürekli kayıt istasyonlarında SLR düzeyindedir.

Tablo 2.1 Değişik ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması (**Montag (1997)**'den)

(Sütunlardaki sayıların anlamı 4:biricik, 3:yüksek, 2:anlamli, 1:az, 0:hiç)

Kavram	Jeodezik Problem	VLBI	SLR /LLR	GPS	DORIS
Jeodezik referans sistemi	Uzayda yöneltme	4	2	0	0
	Yersel ref. sist. Yöneltme	3	4	3	3
	Ölçek	3	4	2	1
	Yerin merkezi	0	4	2	2
	Yükseklik sistemi datumu	1	3	2	1
	Gravite alanı	0	3	4	3
Yeryüvarı deformasyonları inceleme	Küresel levha tektoniği	3	3	3	3
	Küresel yükseklik değişimi	2	3	2	2
	Bölgesel yatay hareket	2	2	4	2
	Bölgesel düşey hareket	1	2	2	2
	Sismik deformasyonlar	2	2	3	2
Yer dönme hareketi ve zaman	Kutup hareketi				
	- seküler	3	3	1	1
	- uzun peryod	3	3	3	3
	- kısa peryod (<1 gün)	3	1	4	3
	Zaman (UT)				
	- seküler	4	1	0	0
	- uzun peryod	4	2	1	1
	- kısa peryod (<1 gün)	3	1	2	2
Gel-git etkileri	Kara	2	2	1	1
	Okyanus	0	2	1	1
	Baskı etkileri	2	2	2	2
Gravite alanı değişimleri	Gel-git nedeniyle	0	2	1	1
	Gel-git nedeniyle olmayan	0	1	1	1
	Seküler	0	2	0	0

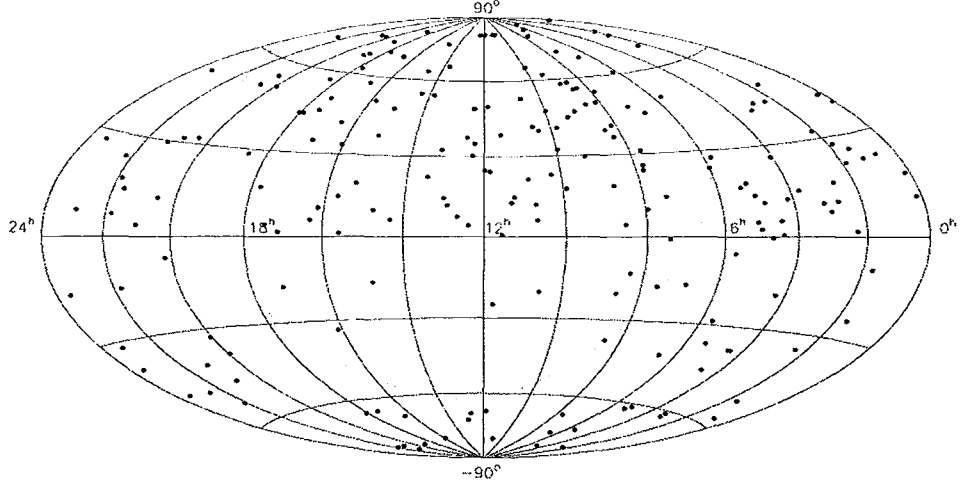
2.3.2 ICRF (International Celestial Reference Frame)

Gök koordinat sistemlerinin gerçekleştirilmesinde bugün için kullanılan en üstün yöntem VLBI yöntemidir. Yeryüzüne dağılmış az sayıdaki istasyonlarda kuasar denen galaksi ötesi cisimlerden, elektromanyetik spektrumun radyo dalgaları kesiminde ve belirli bir bant aralığında yayılan ışıınım, uygun antenlerle alınır ve kaydedilen sinyaller çeşitli modellerdeki korelatörler yardımıyla analize tabii tutulur.

Korelatörlerin çalışma prensibi GPS ile PRN kod ölçülerinden ön uzunluk hesaplama mantığı ile aynıdır (**Whitney, 2000**). Bu analiz sonunda istasyonlar arasındaki baz uzunluğu $\pm 2 \text{ mm} \pm 1 \text{ ppb}$ doğrulukla elde edilebilmektedir. VLBI, sağladığı bu yüksek presizyondan ötürü göksel referans sistemleri için tek yöntemdir. İnersiyal sistemlerin gerçekleştirilmesinde dayanak alınacak noktaların hemen hemen hareketsiz olmaları istenir. Kuasarların yeryüzünden oldukça uzakta ve öz hareketlerinin küçük olması, inersiyal sistem tanımlaması için referans alınmalarına neden olan VLBI'in yüksek presizyonuna ek olarak sayılması gereken uygun özellikleridir. VLBI, yerin dönme hızındaki değişimi de gösteren LOD (Length Of Day) büyüklüğünün belirlenmesinde en ideal yöntemdir.

Uluslararası Göksel Referans Ağı 212 galaksi ötesi cisime VLBI yardımıyla gerçekleştirilen gözlemlerle türetilmiştir. Sistemin merkezi güneş sisteminin ağırlık merkezinde ve eksenlerinin yönü FK5 optik kataloğu ile çakıştırılan bir koordinat sistemidir. Sistemde kuasarların koordinatları ekvatoryal sistemde açılım ve deklinasyon parametreleri ile verilmektedir. 212 adet sistemi gerçekleştirmeye yarayan cisim yanında sistemin ileriki tarihlerde doğruluğunu ve güvenilirliğini artıracak 294 “aday” cisim ile doğrulukları daha düşük 102 “diğer” cismin de katalog koordinatları verilmiştir. Cisimlerin bu şekilde sınıflandırılmasında gözlem yapılan kuasarla elde edilen gözlem doğruluğu, bu doğruluğun tekrarlanabilirliği ile cismin öz hareketi ile kompaktlığı gibi astrofizik ölçütler etkili olmuştur. Ayrıca milyarlarca ışık yılı uzaklıktaki bu cisimlerin zamanla değişim gösterebileceği, dolayısıyla bu üç kategori arasında kaymaların olacağı da düşünülmüştür (**Ma ve diğ., 1998**). ICRF'in gerçekleştirilmesinde kullanılan, gözlemlerinden yararlanılan 212 kuasarın gök küresindeki dağılımı Şekil 2.3'de görülmektedir. Dağılımın homojen olmadığı, güney yarımküredeki cisim sayısının azlığı dikkat çekmektedir. Bu, VLBI istasyonlarının daha çok kuzey yarımkürede bulunmasından kaynaklanmaktadır. ICRF katalog koordinatları doğruluğu $\sigma_\alpha = \pm 0.35 \text{ mas}$, $\sigma_\delta = \pm 0.40 \text{ mas}$ olarak verilmektedir (**McCarthy ve Petit, 2004**). Bu değerler ölçekli olarak verilmek istendiğinde yeryüzünde 1.1 ile 1.2 cm arasında bir uzunluğa karşılık gelmektedir. ICRF'in yersel referans sistemi ile güneş sistemindeki güneş, ay ve gezegen koordinatlarının verildiği dinamik sistem arasında ilişkilendirilmesi amacıyla X ekseninin yönü, 3C 273B kuasarı için J2000.0 epogundaki açılım değeri

FK5 yıldız kataloğu değerine eşit alınmak suretiyle belirlenmiştir (McCarthy, 1996; Fricke, 1982).



Şekil 2.3 ICRF 'i tanımlayan 212 kuasarın Aitoff kartografik projeksiyonunda gök küredeki konumları (Ma ve diğ.(1998)'den alınmıştır.)

Güneş sistemi içindeki güneş, ay ve diğer gezegenler ile asteroid gibi gök cisimlerinin koordinatlarının ifadesinde kullanılan sistem dinamik koordinat sistemi olarak adlandırılır. En yenisi NASA'ya bağlı JPL (Jet Propulsion Laboratory) tarafından geliştirilen DE405/LE405'tir. Bu sistemin gerçekleştirilmesinde güneşe yakın dört gezegen (Merkür, Venüs, Mars, Jüpiter) için uzunluk ölçmeleri ile Venüs ve Mars için VLBI gözlemleri kullanılmıştır. Diğer gezegenler için optik yöntemler ile ay için LLR yöntemlerinden yararlanılmıştır. Sistemin ICRF'e bağlanması için Venüs ve Mars misyonlarına yapılan VLBI gözlemleri kullanılmıştır (Standish ve diğ., 1995; Standish, 1998).

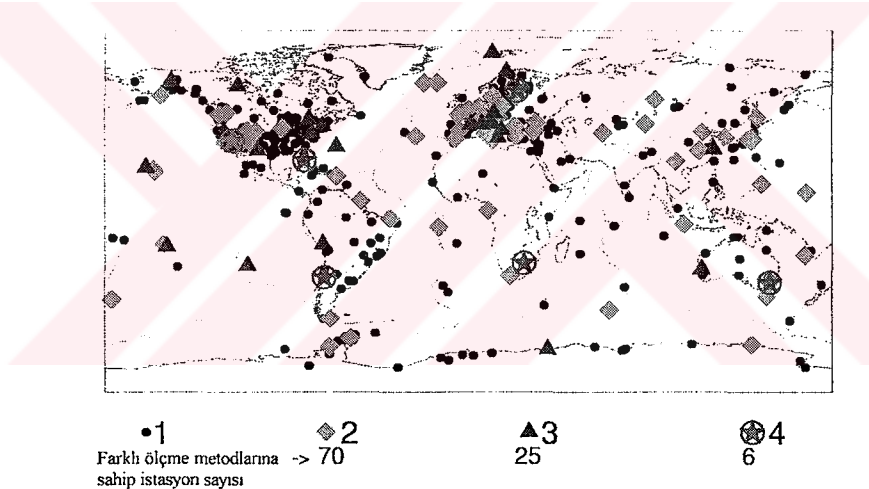
2.3.3 ITRF (International Terrestrial Reference Frame)

Yersel referans sistemlerinin bugüne kadar ITRF88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 96, 97 ve sonuncusu 2000 olmak üzere 10 gerçekleştirimi yapılmıştır. Bunlardan sonuncusu olan ITRF2000'in ölçeği VLBI ve SLR ile verilmiştir. Ölçeklendirme ITRF97'nin aksine yer merkezli zaman (TCG) kullanılarak değil jeoid üzerindeki zaman (TT: Terrestrial Time) baz alınarak yapılmıştır (McCarthy ve Petit, 2004; Seidelmann ve Fukushima, 1992). Burada ölçeklendirme ile yalnızca ağırlık ölçeğinin belirlenmesi algılanmamalı genel relativistik anlamda ölçeklendirme de anlaşılmalıdır. Yerin merkezine en duyarlı sistem olan SLR çözümlerinin ağırlıklı ortalamasıyla yer

merkezli koordinat sisteminin başlangıcı belirlenmiştir. Eksenlerin yöneltmesi ITRF97'e göre yapılmış ve yöneltmenin zamansal değişimi için NNR-NUVEL-1A jeolojik modeli ile verilen büyük levhaların açısal hızı esas alınmıştır (DeMets ve diğ., 1994). Artık dönüklüğün sıfır olma şartı hız ve konum vektörleri verilen sonlu noktalarda küresel kutupsal koordinatlarla

$$\iint_{\Omega} \vec{v} \times \vec{r} \sin \theta d\theta d\lambda \quad (2.1)$$

integralinin sıfıra eşit yapılmasıyla sağlanır. Yeyüzünde bazı noktalarda noktaların modern yöntemlerle bulunan hızları ile NNR-NUVEL-1A hızları birbirlerinden oldukça farklı olduklarından söz konusu noktalar (2.1) eşitliğinde kullanılmamıştır (Altamimi ve diğ., 2001). Şekil 2.4'de ITRF2000'in gerçekleştirilmesinde kullanılan noktalar ağı görülmektedir. Sistemin elde edilmesinde GPS, DORIS, SLR/LLR ve VLBI olmak üzere 4 farklı ölçme yönteminden yararlanılmıştır.



Şekil 2.4 ITRF2000 ağı (Altamimi ve diğ. (2002a)'den alınmıştır)

2.4 ICRF ve ITRF Arasında Dönüşüm

Yerin dönme eksenini uzayda iki tür hareket yapar. Bunlar yukarıda da kısaca değinildiği üzere presesyon ve nutasyon ile kutup hareketidir. Bunlardan ilki dış bir etkinin yeryuvarını zorlaması olarak ortaya çıkarken ikincisi yerin serbest salınımı sonucunda ortaya çıkmaktadır. Anlık bir t zamanında koordinatları yersel sistemde verilen bir noktanın göksel sistemdeki koordinatlarını bulmak veya tersi için yukarıda verilen presesyon, nutasyon, kutup hareketi ve Greenwich gerçek yıldız

zamanı gibi büyüklüklerin kullanılması gerekir. Bu şekilde iki sistem arasında dönüşüm

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{CRS} = \underline{P} \underline{N}(t) \underline{R}(t) \underline{W}(t) \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{TRS} \quad (2.2)$$

ile verilebilir. Eşitlikte geçen

$$\underline{W}(t) = \underline{R}_1(y_p) \underline{R}_2(x_p) \quad (2.3)$$

ile tanımlanır. Bu dönüşüm ile t anlık zamanındaki koordinatlar ortalama kutup yönünde tanımlanan sisteme dönüştürülür. $\underline{R}_1$ ve $\underline{R}_2$ sırasıyla X ve Y eksenlerindeki dönme matrislerini ifade etmektedir.

$$\underline{R}(t) = \underline{R}_3(-GST) \quad (2.4)$$

dönme matrisi ile de $(XY)_{TRS}$ düzlemi, X_{TRS} ekseninin yönü ilkbahar noktası olacak şekilde döndürülür. Burada Greenwich gerçek yıldız zamanı GST

$$GST = GMST + \Delta\psi \cos \varepsilon_A + 0''.00264 \sin \Omega + 0''.000063 \sin 2\Omega \quad (2.5)$$

ile verilir. Eşitlikte geçen $GMST$ Greenwich ortalama yıldız zamanını, $\Delta\psi$ nutasyon bileşenini, ε_A ekliptik eğimini ve Ω ise ay yörünge düzleminin ekvatorla kesişiminin ortalama boylamını (rektesansiyon da denilebilir) ifade etmektedir. Greenwich ortalama yıldız zamanı $GMST$, gözlemin yapıldığı UTC anı için

$$GMST = 6^h 41^m 50^s .54841 + 8640184^s .812866 T_u' - 0^s .093104 T_u'^2 - 6^s .2 \times 10^{-6} T_u'^3 + r[(UT1 - UTC) + UTC] \quad (2.6)$$

eşitliği ile bulunabilir. $UT1-UTC$ değeri IERS Bültenlerinden alınan gözlemle bulunan değeri ve T_u' ise 1 Ocak 2000 $UT1=12^h$ den itibaren sayılan, yüzyıl biriminde gün sayısını ifade etmektedir. Eşitlikte geçen r

$$r = 1.002737909350795 + 5.9006 \times 10^{-11} T_u' - 5.9 \times 10^{-15} T_u'^2$$

şeklinde verilir (McCarthy, 1996).

Presesyon ve nutasyonun hesaba alınması kutup hareketi parametrelerine nazaran daha karmaşıktır. Kutup hareketi parametrelerinin aksine presesyon ve nutasyon büyüklükleri ölçülmeyip daha önceden belirlenen harmonik katsayılarla trigonometrik seriler kullanılarak ölçme zamanı için belirlenebilir. IERS tarafından IAU 1976 Presesyon ve IAU 1980 Nutasyon modelleri kabul görmüştür. Ancak VLBI ve SLR ölçmelerinden çıkan sonuçların rijid bir yeryuvarı kabul eden bu modellerle örtüşmediği anlaşıldığından rijid olmayan bir yer hipoteziyle yenisi üretilmiştir. IAU Presesyon/Nutasyon modelinden sapmalar ($d\psi$ ve $d\varepsilon$) IERS tarafından yayımlanan Bulletin B'de duyurulmaktadır (McCarthy, 1996; IERS, 2002). 1 Ocak 2003'ten itibaren 1996 IERS konvansiyonlarının yerini 2003 konvansiyonları almıştır. Bu çalışmada 1996 konvansiyonları ile çalışıldığından tanımlamalar buna göre verilmiştir. Yeni 2003 konvansiyonları ile ilgili ayrıntılı bilgi Capitaine ve diğ. (2002), Deniz ve diğ. (2003), McCarthy ve Petit (2004)'de bulunabilir.

3. GPS ÖLÇÜLERİNİN MODELLENMESİ

3.1 Genel Bilgiler

GPS, Amerikan askeri ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla geliştirilmiş ve halen geliştirilmekte olan bir konumlama sistemidir. Sistem, temellerinin atıldığı 70'li yılların sonundan 1994 yılına kadar deneme aşamasında olmuş ve 1994 yılında tam operasyonelliği (FOC: Full Operational Capability) ilan edilmiştir. GPS, birbirini bütünüleyen 3 kısımdan oluşmaktadır.

Çeşitli modellerde uydular, GPS'in uzay bölümüdür. Uydular, ekvator düzlemi ile 55° açı yapacak şekilde yine ekvator düzleminde 60° aralıklı 6 farklı yörünge düzleminde ortalama 3.9 km/s hızla hareket ederler. Her bir düzlemde en az 3 uydu yer etrafında dolanımdadır. Yörünge düzlemlerinin eksentritesi çok küçük olduğundan yaklaşık olarak dairesel bir şekle sahiptir ve yörünge'nin yerden yüksekliği ortalama 20200 km'dir. Mayıs 2004 itibariyle yörüngedeki toplam GPS uydusu sayısı 30'dur. Sistemin operasyonelliğini devam ettirmek üzere ihtiyaç duyuldukça yeni uydular fırlatılmaktadır.

Uyduların aktif olarak sinyal gönderebilmesi için gerekli enerji ihtiyacı, taşıdıkları ve uydu hareket ettikçe sürekli güneşe yönelen güneş panelleri yardımıyla karşılanmaktadır. Ancak uydulara tam tutulma bölgelerinde güneşten hiç enerji alamayacakları düşünülerek batarya da yerleştirilmiştir. Uydu yörüngelerinin, seküler ve rezonans değişimleri sonucu diğer uyduların ve genel olarak sistemin güvenliğini etkileyebilecek kritik bir duruma gelmeleri halinde manevra yaptırabilmek için uydulara sıvı yakıt da yüklenmiştir.

Tarihsel gelişimi içinde ele alındığında 4 farklı uydu tipinden bahsedilebilir. Bunlar Block I, II, IIA ve IIR olarak isimlendirilmektedir. 1978 yılında ilki uzaya gönderilen Block I uyduları 1994 yılından sonra tamamen kullanımdan kalkmıştır.

GPS verilerinin işlenmesinde en önemli hata kaynaklarından biri de uydu ve alıcı anten faz merkezlerinin kayıklığı olmaktadır. Örneğin Block IIR uydularından PRN13’de uydu anteni için 1 m’lik bir faz kayıklığı tespit edilmiştir. Gerek uydu ve gerekse alıcı için elektriksel ve geometrik merkezler arasındaki bu belirsizlik en önemli hata kaynaklarından birisi olmaya devam etmektedir (Springer, 2000).

Uydular, yayınladıkları sinyalleri üretilebilmesi için gerekli 2 adet Sezyum, 2 adet de Rubidyum atom saati taşımaktadırlar. Bu saatlerin stabilitesi 10^{-13} ile 10^{-14} s/gün arasında değişmektedir. Gelecekte GPS uydularının H-Maser atom saatleri ile donatılması düşünülmektedir. Bu tip saatlerle yeryüzündeki sabit istasyonlarda elde edilen stabilite Sezyum ve Rubidyum standartlarından yaklaşık 1 mertebe daha iyidir (Senior ve diğ., 2001).

GPS kontrol birimi, ana kontrol ve izleme istasyonlarından oluşmaktadır. İzleme istasyonları, GPS uydularından pseudo uzaklık ölçmesi yapmakta ve bu verileri ana kontrol istasyonuna iletmektedirler. Askeri bir birim olan ve eski adı DMA (Defense Mapping Agency) olan NIMA (National Imagery and Mapping Agency) tarafından işletilen ek istasyonlardan da veriler ana kontrol istasyonuna gönderilmektedir. İzleme istasyonları ile ek istasyonlardan gelen bu verilerle ana kontrol istasyonu, kullanıcı için önemli olan yayın efemerisini (Broadcast Ephemeris) dinamik bir yaklaşımla Kalman Süzgeçlemesi algoritması kullanarak kestirir. GPS uydularının yörüngelerinde belirli periyotlarda yapılması gereken kritik değişikliklere karar almak ve bunları uygulamak da ana kontrol istasyonunun bir görevidir.

GPS’in bir diğer bölümünü kullanıcılar oluşturur. Kullanıcılar, çeşitli ticari kuruluşlarca geliştirilen alıcı ve antenleri amaçları doğrultusunda kullanan, sistemin pasif birimini oluşturmaktadır. Kullanıcıların amaç ve ihtiyaçları statik, hızlı statik, kinematik veya gerçek zamanlı kinematik ölçme yöntemlerinden birini kullanmayı gerektirebilir. Bu çalışmada GPS ile konum belirlemenin yapılacağı noktalarda GPS antenlerinin sabit olarak alınacağı ve antenlerin hareket ettirilmediği ve sürekli olarak belirli aralıklarla veri topladığı sabit istasyon kavramıyla statik ölçme yöntemleri ele alınacaktır. GPS kullanıcıları, sisteme müdahale edememekle birlikte özellikle bilimsel çalışmalarda yüksek presizyon elde edebilmek için kendi çözümlerini üreterek bunları kullanabilmektedirler.

3.2 GPS Sinyal Yapısı

GPS uzay sistemini oluşturan uydulardan gönderilen dalgalar, dalga boyuna ve dalga kullanım amacına bağlı olarak ikiye ayrılır. Ölçü dalgası olarak C/A ve P olarak isimlendirilen sırasıyla 300 ve 30 m'lik chip uzunluklarına sahip dalgalar kullanılır. Her iki ölçü dalgasının tekrarlama periyotları farklı olup C/A için 1 ms P için ise 37 haftadır. P kodunun birer haftalık kesimleri tek tek uydulara dağıtılmıştır. Böylece alıcıda alınacak bu kodların hangi uydudan geldiği gibi bir sorgulama söz konusu olmamaktadır. Yukarıda dalga veya chip uzunlukları belirtilen kod sinyallerini alıcıya ulaştırmak üzere kullanılan, bunlara nazaran daha kısa dalga boylu iki farklı sinüs dalgası daha mevcuttur. Bu taşıyıcı dalgaların elektromanyetik spektrumun mikrodalga kesimi olarak nitelendirilen L-bandına karşılık gelen yaklaşık dalga boyları 19 ve 24 cm'dir. Bütün sözü edilen C/A, P, L1 ve L2 dalgaları, uydularda günlük stabilitesi $10^{-13} - 10^{-14}$ olan rubidyum ve sezyum atomik saatleri yardımıyla tek bir ana frekanstan yararlanılarak türetilir. GPS için frekans ve dalga boyları Tablo 3.1'de görülmektedir.

Tablo 3.1 GPS'de kullanılan dalgalar

Dalga / Kod	Frakans	c / f
Ana Frekans	$f_0 = 10.23 \text{ MHz}$	$\sim 30 \text{ m}$
C/A	$f_0/10$	$\sim 300 \text{ m}$
P	f_0	$\sim 30 \text{ m}$
L1	$154 \times f_0$	$\sim 19 \text{ cm}$
L2	$120 \times f_0$	$\sim 24 \text{ cm}$

Tablo 3.1'de verilenler dışında kullanıcının konumunu eş zamanlı olarak belirleyebilmesi için en önemli bileşen olan navigasyon verisi de uydulardan gönderilir. Yayın efemerisi (Broadcast Ephemeris) olarak isimlendirilen bu veriler, uydunun bir zaman için konum bilgilerini ve uydu yörüngesinin bozucu etkiler sonucu değişimlerini referans zamana göre vermektedir. Uydu yörünge bilgileri Kepler elemanları cinsinden verilmektedir.

Ölçü dalgası olarak nitelendirilen C/A ve P dalgaları ile yayın efemerisi bilgileri, taşıyıcı L1 ve L2 dalgalarına modülasyon yardımıyla bindirilirler. P1 ve P2 kodları her iki taşıyıcıya modüle edilirken, C/A yalnızca L1 taşıyıcı dalgasında yer alır.

Bir istasyondaki GPS alıcısıyla 7 farklı türde ölçü kaydetmek mümkündür. Bunlar C/A kod ölçüsünden korelasyon ile hesaplanan pseudorange, L1 ve L2 taşıyıcı dalgasına modüle edilen ve alıcıda ayrıştırılan yine alıcıdaki örnek kodlarıyla karşılaştırmak suretiyle maksimum korelasyon ile elde edilen P1 ve P2 kod ölçmeleri ile taşıyıcı dalga faz ölçmeleri ve her iki taşıyıcı dalga için Doppler ölçmeleridir.

Jeodezik ve jeodinamik uygulamalarda en yüksek doğruluğu elde etmek için her iki frekanstaki faz ölçmelerini kullanmak gerekmektedir. Navigasyon çözümü yanında jeodezik ölçmelerde modellemeye yardımcı olan kod ölçmeleri de kullanılabilir.

3.2.1 GPS Kod Gözlemleri

GPS ile navigasyon amaçlı ölçmelerin temelini oluşturan kod ölçmeleri, alıcı anten ile uydu arasındaki toposentrik uzunluğun modellenmesi prensibine dayanır. Uyduda bir t^k zamanında üretilen C/A ve/veya P kodunun, t_i zamanında alıcıda ölçüldüğü varsayılabilir. Aşağıda ayrıntılarıyla açıklanacak ve modellenmesi yapılacak bozucu etkenler ihmal edilirse toposentrik uzunluk

$$\rho_i^k(t_i) = c(t_i - t^k) \quad (3.1)$$

olacaktır. (3.1) eşitliğinde uydu ve alıcı saatlerinin belirli bir zaman sistemine göre kayıklıkları sözkonusu olduğundan bulunacak uzunluk gerçek geometrik uzunluk olmayacaktır. Buna (görünen) pseudo uzaklık denir. GPS için zaman sistemi, bütün uydulardaki atom saatlerinden türetilen GPS zamanı olduğundan ve bu, gerçek zaman olarak kabul edildiğinden gerçek zamana göre saat hataları uydu ve alıcı için

$$t_r^k = t^k + dt^k \quad (3.2a)$$

$$t_{r,i} = t_i + dt_i \quad (3.2b)$$

olarak ifade edilebilir (Leick, 1995). (3.2a) ve (3.2b)'de t^k ve t_i gerçek zamanın fonksiyonu olarak yazılırsa

$$P_i^k(t_i) = c(t_{r,i} - t_r^k) - c(dt_i - dt^k) \quad (3.3a)$$

$$P_i^k(t_i) = \rho_i^k(t_{r,i}) - c(dt_i - dt^k) \quad (3.3b)$$

görünen uzaklık denklemi elde edilir. Uydu ve alıcı saatlerinin GPS zamanı ile senkronize olmamasından kaynaklanan hatalar yanında uydu tarafında sinyalin üretildiği merkez ile uydu anteni, kullanıcı tarafında da uydudan gelen sinyalin alındığı anten ve alıcının elektrik merkezi arasındaki yol 3.3 eşitliğinde dikkate alınmalıdır. Bu etkiler zamana bağlı olarak değişen etkiler olmasına rağmen bir süreksizlik göstermemektedir (Leick, 1995). Bu durumda yeni ön uzunluk eşitliği

$$P_i^k(t_i) = \rho_i^k(t_{r,i}) - c dt_i + c dt^k + c \delta_i + c \delta^k \quad (3.4)$$

biçimini alır. Burada δ_i ve δ^k sırasıyla alıcı ve uydudaki gecikmelerin zaman biriminde ifadesidir. Uyduda üretilen kod sinyalleri, alıcıya ulaşana dek atmosferik tabakalardan geçmesi gerekir. Atmosferin sinyale etkisi, sinyalin dalga boyuna bağlı olarak değişmektedir. L bandında taşıyıcı dalga kullanan GPS için bu etki iki farklı şekilde olmaktadır. Atmosferin üst katmanlarında serbest iyonların bulunduğu ve iyonosfer olarak isimlendirilen tabakadan geçen taşıyıcı dalgalar bir faz ilerlemesine maruz kahrken, bu dalgalar üzerine modüle edilen kod sinyalleri ise tersine bir gecikmeye uğrarlar. Bu etkilerin sayısal büyüklükleri ters işaretli olup mutlak değerce birbirine eşittirler. Atmosferin daha alt katmanlarında, iyonizasyonun olmadığı nötr bir ortam olan troposferde 15 GHz'e kadar dalga gecikmeleri farklılık göstermez (Hofmann-Wellenhof ve diğ., 1997). Sözü edilen iyonosfer ve troposferden kaynaklanan etkilerin (3.4) eşitliğinde modellenmesi gerekecektir.

$$P_i^k(t_i) = \rho_i^k(t_{r,i}) - c dt_i + c dt^k + c \delta_i + c \delta^k + I_i^k + T_i^k \quad (3.5)$$

Görünen uzaklık ölçmelerinin modellenmesinde son olarak uydu ve alıcı çevresindeki yüzeylerden yansıma dolayısıyla oluşan çok yolluluk (multipath) de

dikkate alınmalıdır. Ayrıca bütün bahsedilen sistematik etkilerin yanında rastlantısal nitelikteki ölçme hatalarının da eklenmesiyle sonuç görünen uzaklık gözlem eşitliği

$$P_i^k(t_i) = \rho_i^k(t_{r,i}) - c dt_i + c dt^k + c \delta_i + c \delta^k + I_i^k + T_i^k + \delta m_i^k + v_i^k \quad (3.6)$$

şeklini alır.

(3.6) eşitliğinin navigasyon amaçlı değerlendirilmesinde eşitliğin sağ tarafındaki terimlerin bir kısmı kestirilirken bir kısmının da modellenmesi yoluna gidilir. Örneğin iyonosfer ve troposfer için deterministik bir modelleme kullanılabilir.

Navigasyon amaçlı çözümler için kod ölçülerinin kullanılması yeterli olacakken bu ölçülerin jeodezik çalışmalarda doğrudan gözlem verisi olarak kullanılması mümkün değildir. Zira faz ölçmeleri günümüz alıcılarıyla mm doğrulukla yapılabilirken kod ölçmeleri en optimistik bir kestirimle dm mertebesinde doğrulukla elde edilebilmektedir. Buna ek olarak kod ölçmeleri, faz gözlemlerine kıyasla çokyolluluktan daha fazla etkilenirler (Leick, 1995; Seeber, 1993). Bu dezavantajlar sonucunda kod ölçmelerinden jeodezik ve jeodinamik amaçlı yüksek doğruluk gerektiren çalışmalarda yararlanılmıyacağı gibi bir çıkarsama yapmak da yanlış olacaktır. Çünkü iki farklı taşıyıcı dalga boyuna modüle edilen kod ölçmeleri tamsayı belirsizliğinin çözümüne katkı sağlar (Blewitt, 1989; Seeber, 1993).

3.2.2 GPS Faz Gözlemleri

Faz ölçmeleri için gözlem eşitliği, kod ölçmeleri için verilen (3.6) eşitliğine benzer:

$$\Phi_i^k(t_i) = \rho_i^k(t_{r,i}) - c dt_{i,\varphi} + c dt_\varphi^k + c \delta_{i,\varphi} + c \delta_\varphi^k - I_i^k + T_i^k + \delta m_{i,\varphi}^k + \lambda N_i^k + v_i^k \quad (3.7)$$

(3.6) eşitliğine ek olarak N_i^k tamsayı belirsizliği terimi (3.7)'e dahil edilmiştir. Tamsayı belirsizliği, taşıyıcı dalganın uydudan alıcıya gelene kadar dalga tepesi veya çukuru sayısı ile ifade edilen dalga boyu uzunluğunun tam katlarıdır. Ayrıca (3.7) eşitliğinde alıcı ve uydu saat hataları ile donanımına bağlı gecikmelerin ve çokyolluluk terimlerinin alt indis φ ile genişletildiğine dikkat edilmelidir. Bu terimler kod ve faz ölçmeleri için farklı büyüklükte dirler. (3.6) ile (3.7) arasındaki bir başka fark

iyonosferin, L1 ve L2 frekansındaki taşıyıcı dalgalarda faz ilerlemesine neden olduğu için bu terim önündeki işaretlerdir. (3.7) eşitliği, GPS ile jeodezik ve jeodinamik anlamda yüksek presizyonda konum belirlemede kullanılan gözlem eşitliğidir.

GPS ile yüksek doğruluklara ulaşmak için farklı frekanslardaki gözlemlerin çeşitli kombinasyonları ile aynı frekanslı gözlemlerin farklı istasyonlardaki farklarının oluşturulması değerlendirme stratejilerinin temelini oluşturmaktadır. Bu amaçla GPS ölçülerinin, fonksiyonel büyüklükler ile modellenmesi için faz gözlemlerinin kombinasyonlarından bahsedilmelidir.

3.3 Faz Gözlemlerinin Lineer Kombinasyonları

3.3.1 Aynı Tür Faz Gözlemleri Arasındaki Kombinasyonlar

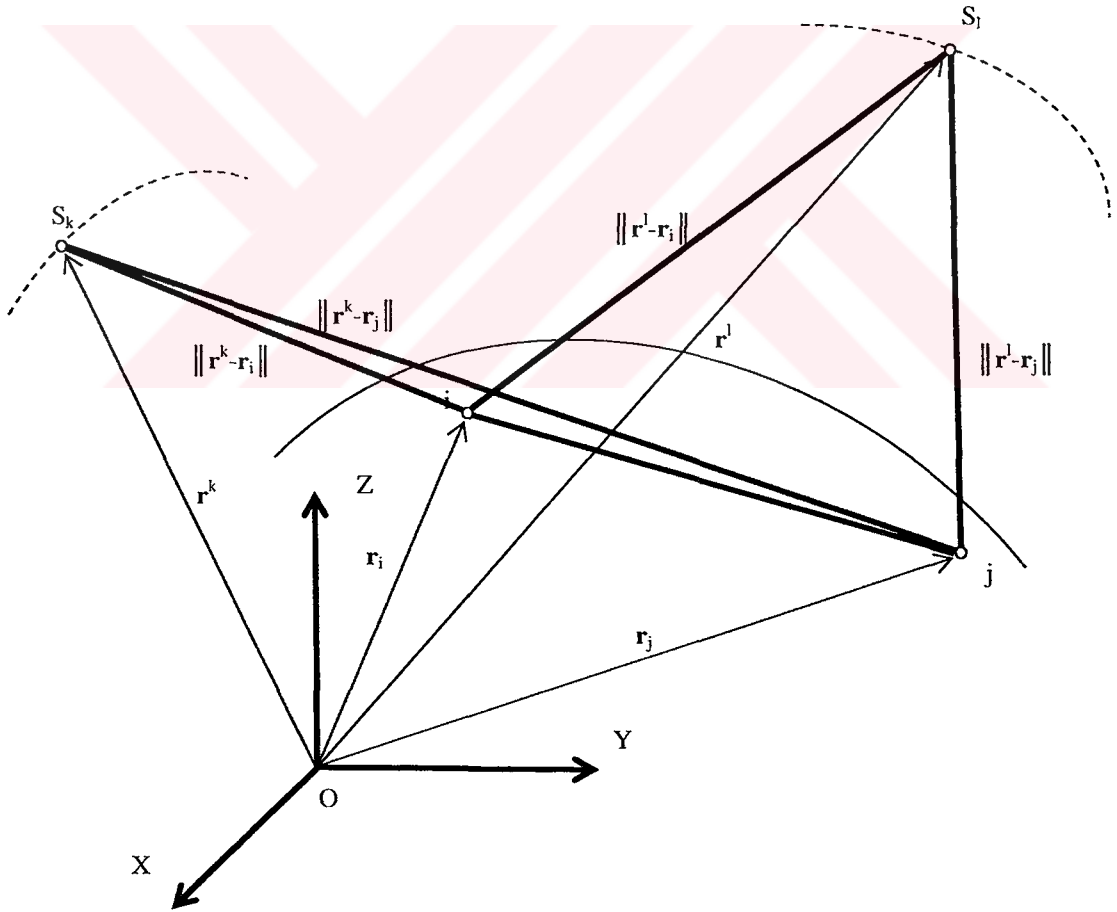
Uydu ve alıcı kaynaklı hataların elimine edilmesi maksadıyla tekli ve ikili farkların oluşturulması yöntemine başvurulur. Bu farkların elde edilmesinde tek frekanstaki gözlemlerden yararlanılır. Kombinasyon için gözlemlerin birinci dereceden fonksiyonları oluşturulduğundan pratikte doğrusal/lineer kombinasyonlar söz konusu olmaktadır.

i ve j noktalarından aynı uyduya yapılan faz gözlemleri birbirinden çıkarılarak GPS ölçmelerinde *tekli farklar* olarak bilinen eşitlikler bulunur. Tekli farklar ile uydu kaynaklı saat hataları ve gecikmeler elimine olmaktadır. Aynı şekilde sabit bir i noktasından farklı k ve l gibi iki uyduya yapılan faz gözlemlerinin farkıyla da alıcı kaynaklı hata ve terimler elimine olmaktadır. i ve j noktalarından k ve l uydularına yapılan gözlemlerin tekli farklarının tekrar farkı ile *ikili farklar* elde edilir (Şekil 3.1).

$$\begin{aligned} \Phi_j^{kl}(t_i) - \Phi_i^{kl}(t_j) = & \|\mathbf{r}^l - \mathbf{r}_j\| - \|\mathbf{r}^k - \mathbf{r}_j\| - \|\mathbf{r}^l - \mathbf{r}_i\| + \|\mathbf{r}^k - \mathbf{r}_i\| \\ & - I_j^{kl} + I_i^{kl} + T_j^{kl} - T_i^{kl} + \delta m_j^{kl} - \delta m_i^{kl} \\ & + \lambda N_j^{kl} - \lambda N_i^{kl} + v_j^{kl} - v_i^{kl} \end{aligned} \quad (3.8)$$

(3.8) eşitliğinden görüleceği üzere ikili fark eşitliklerinde uydu ve alıcı kaynaklı saat hataları tamamen elimine olmakta, iyonosferin etkisi lokal ağlarda oldukça azalmaktadır. Ancak baz uzunluğu arttıkça ikili farklar etkili olamamaktadır.

(3.8) ikili fark eşitliği, aynı gözlem noktalarında ancak ardışık bir zamanda yine aynı uydulara yapılacak gözlemler için oluşturulursa ve bu t_1 ve t_2 zamanları için elde edilen ikili farkların da tekrar bir farkı alınır üçlü farklar elde edilir. Üçlü farklar ile ikili fark tamsayı belirsizliği terimi elimine olmaktadır. Üçlü farkların bu özelliği, faz ölçmelerinde faz kayıklığı olarak bilinen ve doğruluğu azaltıcı etki yapan faz sıçramalarının sayısal olarak belirlenmesinde kullanılır ve birçok yazılıma kaba hatalı ve uyumsuz faz ölçülerinin lokalizasyonunda standart algoritma olarak entegre edilmiştir.



Şekil 3.1 İkili farkların yersel koordinat sisteminde gösterimi (Aksoy ve Ayan, 1987)

3.3.2 Farklı Tür Faz Gözlemleri Arasındaki Kombinasyonlar

Tekli ve ikili farkların aynı frekanslı (L1 veya L2) faz ölçüleri kullanılarak türetilmesi yerine iki farklı faz ölçüsüne de (L1 ve L2) lineer operatörlerin uygulanması mümkündür. Genel olarak farklı faz ölçüleri için

$$\varphi_{komb.} = k\varphi_1 + l\varphi_2 \quad (3.9)$$

yazılabilir. Burada $k=1$ ve $l=1$ alındığında yeni türetme ölçünün dalga boyu $\lambda_n \approx 10.7 \text{ cm}$, $l=1$ yerine $l=-1$ alınırsa $\lambda_w \approx 86.3 \text{ cm}$ bulunur. Bu iki doğrusal kombinasyondan birincisi “narrow lane” ikincisi “wide lane” olarak isimlendirilir. Bu kombinasyonlardan ikincisi, f_1 ve f_2 frekanslı dalga boyundan yaklaşık 4 kat daha büyük dalga boyu nedeniyle tamsayı belirsizliğinin çözümünde tercih edilmektedir. “Wide lane” parametrisasyonuna gidilmesinin arkasındaki bir başka neden ortaya çıkan tamsayı belirsizliğinin diğer konum, iyonosfer ve “narrow lane” tamsayı belirsizliği büyüklükleriyle korelasyonunun düşük olmasıdır (Leick,1995).

GPS kod ve navigasyon sinyallerinin, birbirinden farklı ve frekans skalasında belirli bir mesafede iki ayrı taşıyıcı dalgaya modülasyonu çok önemli bir başka amaca da hizmet etmektedir ki bu iyonosferin etkisinin belirli bir mertebeye kadar elimine edilmesidir. Esasında aynı tür faz gözlemlerinin ikili farkları oluşturulduğunda iyonosferin etkisi minimuma inmektedir. Ancak bu, kısa bazlarda bazın uç noktalarında iyonosferin etkisinin yüksek korelasyonlu olması nedeniyle gözlenmektedir. Orta ve uzun bazlarda, dalganın her iki noktaya gelene kadar izlediği yolun kısa bazlarda olduğu gibi lokal özellikler göstermemesinden dolayı ikili farklar ile iyonosferik etkinin tamamen giderilmesi mümkün değildir. Bu maksatla iyonosferden bağımsız lineer kombinasyon eşitlikleri oluşturulması yoluna gidilir (Schaffrin ve Bock, 1986; Bock ve diğ., 1986; King ve diğ., 1987; Bock, 1998):

$$E \left\{ \begin{pmatrix} \mathbf{D} \left(\mathbf{I}_1 - \frac{g}{1-g^2} (\mathbf{I}_2 - g \mathbf{I}_1) \right) \\ \mathbf{D} \left(\mathbf{I}_1 + \frac{1}{2g} (\mathbf{I}_2 - g \mathbf{I}_1) - \frac{1+g^2}{2g^2} \mathbf{I}_{ion} \right) \end{pmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} \frac{1}{1-g^2} \mathbf{I} & -\frac{g}{1-g^2} \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \frac{1}{2} \mathbf{I} & \frac{1}{2g} \mathbf{I} & -\frac{1+g^2}{2g^2} \mathbf{I} \end{bmatrix} E \left\{ \begin{pmatrix} \mathbf{D} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{D} \mathbf{I}_2 \\ \mathbf{D} \mathbf{I}_{ion} \end{pmatrix} \right\} =$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{DA}_1 & \frac{1}{1+g} \mathbf{D} & -\frac{g}{1-g^2} \mathbf{D} \\ \mathbf{DA}_1 & \frac{1+g}{2g} \mathbf{D} & \frac{1}{2g} \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_a \\ \mathbf{N}_1 \\ \mathbf{N}_2 - \mathbf{N}_1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

(3.10) eşitliğinde verilen $\mathbf{l}_1$ ve $\mathbf{l}_2$, L1 ve L2 frekansında faz gözlemlerini, $\mathbf{D}$ ikili fark operatörünü, $g=f_{L1}/f_{L2}$ 'yi, $\mathbf{I}$ birim matrisi, $\mathbf{x}_a$, jeodezik bilinmeyenleri, $\mathbf{N}_1$ ve $\mathbf{N}_2 - \mathbf{N}_1$ ise Narrow Lane ve Wide Lane tamsayı belirsizliklerini, $\mathbf{A}_1$ jeodezik parametrelere göre türev katsayılarını göstermektedir. Eşitlikte verilen $E(.)$ ümit değer operatörünü ifade eder. (3.10)'de geçen $\mathbf{l}_{ion}$ 'un fonksiyonel modelde ele alınmasının hiçbir anlamı yoktur. Burada $\mathbf{l}_{ion}=\mathbf{0}$ olarak kullanılır.

Stokastik model için (3.10) eşitliğinde verilen iyonosferden bağımsız lineer kombinasyonlara hata yayılması uygulanarak

$$\Sigma_{II} = \sigma^2 \begin{bmatrix} \frac{1}{(1-g^2)^2} \mathbf{DP}_{\varphi}^{-1} \mathbf{D}^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{1}{4g^2} \left(\mathbf{DP}_{\varphi}^{-1} \mathbf{D}^T + \frac{\sigma_{ion}^2}{\sigma^2} \frac{(1+g^2)}{g^2} \mathbf{DP}_{ion}^{-1} \mathbf{D}^T \right) \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

ifadesi bulunur. (3.11)'de geçen $\mathbf{P}_{\varphi}$ ve $\mathbf{P}_{ion}$ faz ölçmeleri ve iyonosfer için ağırlık matrisini, σ , birim ağırlıklı ölçünün standart sapmasını göstermektedir. (3.11)'de verilen varyans-kovaryans matrisini oluşturmak üzere elektronik uzunluk ölçerler ile ölçmelerde kullanılan doğruluk ifadesinden yararlanılır. Elektronik yöntemlerle kenar ölçmelerinde ölçülen bir kenarın varyansı

$$\sigma_s^2 = a^2 + b^2 S^2 \quad (3.12)$$

biçiminde belirlenir. Burada a , kullanılan uzunluk ölçerin faz ölçme doğruluğu, elektriksel merkez ile geometrik merkez arasındaki kayıklığın doğruluğu gibi uzunluktan bağımsız hataların toplamını ifade eder. Uzunluğa bağımlı bileşen b 'de ise kullanılan frekansın stabilitesi, sıcaklık, kırılma katsayısı gibi büyüklüklere ait hatalar modellenir (Özgen ve Deniz, 1986; Joeckel ve Stober, 1995). GPS ölçmelerinin yapıldığı alıcılar için de yukarıda elektronik uzunluk ölçerler için

gözlemleri kombinasyona gerek kalmaksızın kullanılır. Orta ve uzun bazlı ağlarda ise bu etki otomatik olarak dikkate alınır (Schaffrin ve Bock, 1988). Faz ölçüleri ve iyonosfer için tek frekansta tek bir baz ölçüsü için ortak varyans-kovaryans matrisi

$$\Sigma_{\varphi}(\alpha, \beta, \hat{S}) = \begin{bmatrix} \beta^2 & 0 & \alpha\beta^2 \sec(c\hat{S}) & 0 \\ 0 & \beta^2 & 0 & \alpha\beta^2 \sec(c\hat{S}) \\ \alpha\beta^2 \sec(c\hat{S}) & 0 & \beta^2 & 0 \\ 0 & \alpha\beta^2 \sec(c\hat{S}) & 0 & \beta^2 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

biçiminde seçilecek α ve c sayıları ve ikili farkın söz konusu olduğu her baz için (3.12) eşitliği kullanılarak bulunacak β ile oluşturulur.

3.4 Troposferik gecikme

GPS sinyalleri daha önce de sözü edildiği üzere fiziksel özellikleri itibariyle birbirinden farklı iki tabaka içinden geçerek alıcıya ulaşır. Bu katmanlardan iyonosferin etkisinin gerek iki farklı taşıyıcı dalga gözlemiyle gerekse farklı noktalarda yapılan ölçmelerden ikili farklar oluşturularak giderilebileceği gösterildi. GPS kod ve faz ölçülerinin atmosferin yere yakın katmanı olan troposferde (0 ila 20 km) gecikmeye uğraması sonucunda oluşan etki bu gözlemlerin lineer kombinasyonlarıyla giderilememektedir. Troposferik gecikmenin % 90'lık kısmı kuru hava, kalanı ise su buharı basıncı sonucu ortaya çıkar. İlkinde hidrostatik ikincisine ıslak gecikme de denilmektedir. Yersel elektromanyetik ölçmelerden de bilindiği gibi mikrodalgaların taşıyıcı dalga olarak kullanıldığı uzunluk ölçerlerle yapılan ölçmelerde en büyük hata su buharı basıncının yeteri doğrulukla modellenememesinden kaynaklanmaktadır. Bu yüzden bu aletler artan ölçme doğruluğuna cevap veremeyerek yüksek doğruluklu ölçmeler için pratikte kullanım alanı bulamamıştır. Aynı hata kaynağı GPS ile ölçmeleri de etkilemektedir ve diğer iki bileşene nazaran yükseklik bileşeninin daha az doğrulukla belirlenmesinde uygun geometri olmaması yanında en büyük engellerden birini oluşturmaktadır. Kuru atmosferden kaynaklanan gecikme yeterli doğrulukla belirlenebilirken su buharı etkisiyle oluşan düşük doğruluklarla elde edilmektedir. Bugün için pahalı bir donanım olan su buharı radyometresi (Water Vapor Radiometer, WVR) ile bu gecikme bulunabilmekte ve doğruluğun artırılması mümkün olabilmektedir. Ancak

bu pahalı bir yol olmasından dolayı pek tercih edilmemektedir. GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde zenit yönündeki gecikmenin diğer parametrelerle birlikte tahmin edilmesi bugün en çok başvurulan ve ekonomik bir yoldur (**Bock ve Doerflinger, 2001; Ifadis ve Savvaidis, 2001; Depenthal, 2000**).

3.5 Parametre Tahmini

GPS ile ölçmelerde jeodezik amaçlarla istenilen doğruluğa ulaşmak için kod ölçülerinden ziyade faz ölçüleriyle çalışılır. Uyduda yüksek doğruluklu atom saatleri yardımıyla üretilen dalgaların benzeri alıcılarda da üretilir. Ancak alıcılarda uydulardakinin aksine daha düşük doğruluklu kuars frekans üreteçleri kullanılır. Uydulardan gönderilen sinyaller, seçilen aralıklarla ($\Delta t = 15, 30$ sn gibi) alıcıda kaydedilir. Bu aralıklar, alıcılardaki saatler yardımıyla belirlenir. Dolayısıyla, gerçek zaman olarak kabul edilecek GPS zamanına göre farklı alıcılar için farklı gözlem zamanları olacaktır. Gerçek zaman olarak esas alınan GPS zamanından, alıcı saatlerinin sapması eş zamanlılıktan sapma olarak ortaya çıkmaktadır. Önceki kısımlarda gösterildiği gibi ikili farklar oluşturulmak suretiyle bu sapma ortadan kalkmakta sonuç olarak farklı alıcı zamanları olsa bile ölçülen faz gözlemleriyle türetilen ikili farklar ortak bir zaman sistemine dayanmaktadır. Uydudan gönderilen ve alıcıda alınan demodüle edilmiş (C/A ve P kodları ayrılmış) taşıyıcı dalgalar karşılaştırmak suretiyle faz ölçüsü yapılır. Faz ölçüleri günümüzde kullanılan modern alıcılarda dalga boyunun %1'i ve altında bağlı doğruluklarla rahatlıkla ölçülebilmektedir. Bu da 19 ve 24 cm taşıyıcı dalga boyu için yaklaşık 2 mm'e tekabül etmektedir.

GPS faz gözlemlerinin, kestirilecek büyüklükler cinsinden ifade edilmesi Gauss-Markoff fonksiyonel modeli düzeltme denklemleri

$$\mathbf{v} = \mathbf{A} \mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (3.16)$$

yazılır. Burada $\mathbf{A}$, katsayılar matrisi faz gözlemlerinin bilinmeyenlere göre türev katsayılarını içerir.

GPS ile orta ve uzun baz uzunluklu bir ağ yapısında $\mathbf{x}$ bilinmeyen vektöründe yer alan parametrelerin ne olabileceğini sıralamak yerinde olacaktır. En başta jeodezik

büyüklikler söz konusu olduğundan bir noktanın yer merkezli bir koordinat sisteminde konumunu veren yer vektörü belirlenecektir. Bu koordinat bileşenlerinin ifade edildiği koordinat sistemi 2. bölümde de ifade edildiği gibi durağan olmayıp zamanla değişim gösterdiğinden zamana karşı değişimi ifade eden parametrelerin de kestirilmesi gerekecektir. Bu parametreler presesyon ve nutasyon dışında kutup hareketi parametreleri ile yerin kendi eksenini etrafında yapmış olduğu devinimi ifade eden UT1-UTC büyüklikleridir. Presesyon ve nutasyon büyüklikleri, GPS ile belirlenebilmesine karşın VLBI kadar etkin olamamaktadır (Beutler ve diğ., 1998). Bu yüzden bu iki büyüklüğün fonksiyonel model içinde kestirilmesi pratikte uygulanmamaktadır. GPS ile kutup hareketi parametrelerinin ve UT1-UTC'nin fonksiyonel modele dahil edilerek belirlenmesi bunların doğası gereği kısa periyotlu değişimler göstermesinden kaynaklanmaktadır (Rothacher, ve diğ. 2001).

Uydu konumlarının zamanla deterministik olmayan değişimleri, yukarıda bahsedilen jeodezik büyüklikleri doğrudan etkileyeceğinden uydulara ait konum ve diğer parametrelerin de kestirilmesi yoluna gidilir. Bu parametreler genelde 24 saatlik yay uzunluğu için temsili olacak şekilde modellenirler. Yani her farklı gün için farklı uydu parametreleri tahmin edilir. Ancak IGS çatısı altında yörünge belirlemesi yapan analiz merkezleri bu süreyi daha uzun tutabilmektedirler. Uydu parametreleri 6 adet başlangıç değeri ile güneş radyasyon parametreleridir. Başlangıç değer olarak uydunun örneğin $t = 0$ zamanında konum ve hız vektörleri verilebilir. Ancak bu iki vektörün zamana bağlı hızlı bir değişimi söz konusu olduğundan pratikte zamana karşı değişimleri az olan Kepler elemanlarının kullanılması tercih edilir. Güneş radyasyon basıncı parametreleri, uyduda tanımlanan koordinat sisteminin 3 bileşenine ait birer sabit ve ikişer periyot -veya 1 sabit, 1 dalga genliği ile faz-bilinmeyenini içine alır.

Çalışılan koordinat sisteminden bağımsız tamsayı belirsizliği de GMM'nin fonksiyonel modeline dahil edilmelidir. Çok yüksek presizyonlu jeodezik ve tektonik hareketleri belirlemeye yönelik çalışmalarda gözlem süresi uzun olduğundan (örnek olarak sabit istasyon verilerinin analizi için 24 saat) bu değer reel olarak kestirilir ve tamsayı değerine atama yoluna gidilmez. Reel olarak bulunan değer yerine konarak parametre kestiriminden çıkarılır. Tamsayı bilinmeyenlerine ek olarak kestirilmeleri doğruluğu artırıcı etki yapan ve iyonosfer gibi iki farklı frekanstaki ölçü ile etkisi

minimumuna indirilemeyen troposferik gecikme de göz önüne alınmalıdır. Uydu konumları zamanla değiştiğinden her yön için ayrı bir gecikmenin hesaplanması pratik olarak mümkün olamayacağından özel bir yöne göre gecikme değeri verilmelidir. Bu özel yön istasyondaki zenit yönüdür. Zenit yönündeki troposferik gecikme de tamsayı belirsizliği gibi modellendikten sonra yok edilir. Özel olarak zenit yönündeki gecikme değeri ile alıcı ve uyduyu birleştiren birleştiren doğrultudaki gecikme için projeksiyon fonksiyonları (mapping functions) kullanılır. Bir noktada bir t zamanında ve z yüksekliğinde uydu yönündeki gecikme

$$\Delta(t, z) = \Delta_h m_h(z) + \Delta_w m_w(z) \quad (3.17)$$

ile verilebilir. Eşitlikte geçen Δ_h ve Δ_w zenit yönündeki hidrostatik ve ıslak zenit gecikme bileşenlerini, $m_h(z)$ ve $m_w(z)$ ise her iki bileşen için projeksiyon fonksiyonlarını ifade eder. Bugün için uygulamada en çok kullanılan NMF projeksiyon fonksiyonudur (Niell, 1996). Zenit yönündeki gecikme için atmosferin yere yakın katmanlarının düşey yöndeki gradyen dışında, katmana teğet yöndeki gradyenlerin de parametre kestirimine katılması mümkündür.

4. UYDULARIN VE YER İSTASYONLARININ ZAMANA BAĞLI HAREKETLERİ

4.1 GPS Uydu Yörünge Modellenmesi

Gerek yerin çekim alanında hareket eden uydulara yapılan ölçme anı, gerekse uyduların sinyal yayınlama zamanına karşılık olan t zamanında uydu konumunun bilinmesi gerekmektedir. Bu durumun önemi, mutlak konumun eş zamanlı olarak belirlenmesinin gerektiği navigasyon amaçlı uygulamalarda ortaya çıkmaktadır. Bir koordinat sistemine göre (WGS84, ITRF97, ED50) konumu belirlenecek hareket halindeki cismin bu t zamanındaki koordinat bileşenleri, ilgili gözlem platformlarının (uydu) yine bu t zamanındaki koordinatlarının ölçme anında kullanıcının elinde olması ya da verilen bir aralıkta enterpolasyon/ekstrapolasyonla bulunması halinde mümkündür. Yani kullanıcı konumunu, konumu bilinen uydulara yaptığı gözlemler ertesinde uzaysal geriden kestirme ile bulabilir. GPS örneğinde olduğu gibi uydu koordinatları, diğer ölçü sinyalleri ile birlikte taşıyıcı dalgaya modüle edilmiş bir biçimde alıcıya ulaşır. Uydu koordinatları, inersiyal kartezyen dik koordinatlar olarak değil de Kepler elemanları ve bunların zamana karşı değişim değerleri şeklinde bir veri yapısına sahiptirler. Bu yörünge bilgisi 10 km'e kadar bazların ölçümünde ulaşılabilen mm doğruluğu vermektedir. Uydu koordinatları, kenar uzunlukları 10 km'ye kadar olan ağlarda, ağın datumuna katkıda bulunmaktadır. Zira GPS ile jeodezik amaçlı çalışmalarda ağın datum defekti 3 olmakta, bu da çalışması yapılan ağda bir noktanın sabit seçilmesiyle ortadan kalkmaktadır. GPS ile bağlı konum belirlemede doğrudan elde edilen baz bileşenleri, WGS84 sisteminde ağın yöneltme ve ölçek bilgilerini içermesinden dolayı datum defekti 3'e inmektedir. Ancak baz uzunluklarının lokal ölçekleri aşarak bölgesel veya küresel boyutlarda (10-10000 km) olması durumunda uydu koordinatlarının sonsuz ağırlıklı olarak parametre kestirimine dahil edilmesi, kestirimden elde edilecek doğruluğu önemli ölçüde olumsuz etkileyecektir. Bu durumda uydu koordinat değerlerinin sabit alındığı geometrik yöntemle mm doğruluklara ulaşmak mümkün olmadığından başka bir yola

başvurmak gerekir. Bunun için ya daha doğru yörünge bilgileri kullanılmalıdır ya da uydu koordinatları ile uydu hareketini modelleyen diğer parametreler (güneş radyasyon basıncı parametreleri gibi) nokta koordinatları veya baz bileşenleri gibi bilinmeyenlerle birlikte kestirilmelidir. Böyle bir yaklaşım uydu jeodezisinde dinamik yöntem olarak adlandırılır (Torge, 1975).

Uydu parametrelerinin de diğer ilgilenilen parametrelerle birlikte kestirildiği bir yaklaşım için uydu hareketinin modellenmesi gerekir. Burada uyduya etki eden bütün kuvvetler gözönüne alınır. Matematiksel modelin oluşturulması için klasik mekanik yaklaşımından yararlanılır ve uydunun hareket denklemi, ileride her biri ayrı ayrı ele alınacak $\vec{F}_i$ kuvvet bileşenleri yardımıyla

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = m \ddot{\vec{X}} \quad (4.1)$$

biçiminde yazılabilir. (4.1) eşitliği Newton'un II. Aksiyomu olarak bilinir ve bu eşitlikte yer alan m uydunun kütlesini ve $\ddot{\vec{X}}$ ise inersiyal bir sistemde verilen uydu konum vektörünün zamana göre ikince dereceden türevini göstermektedir. (4.1) eşitliğinin çözülebilmesi için formülün sol tarafında verilen kuvvetlerin kapalı formüllerle veya sayısal olarak modellenmesi gerekir.

4.1.1 Yerin Çekim Alanı

Yer ve uydu arasındaki çekim kuvvetini modellemek için bu kuvvetin oluşturduğu potansiyel V 'nin fiziksel jeodezinin bilinen Laplace denkleminde yararlanılır. V çekim potansiyeli, cismin dışındaki noktalarda Laplace diferansiyel denlemini sağlar. Bu denklem

$$\Delta V = 0 \quad (4.2)$$

ile verilir. (4.2) diferansiyel denkleminin (r, θ, λ) küresel kutupsal koordinatlarla çözümü

$$V = \frac{GM}{r} \left(1 + \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^n [C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda] P_{nm}(\cos \theta) \right) \quad (4.3)$$

olarak verilir (Heiskanen ve Moritz, 1967; Torge, 1975). Burada $GM = 3.986 \times 10^{14} \text{ m}^3 / \text{s}^2$ evrensel çekim sabiti ile yer kürenin ağırlığı çarpımını, r uydunun yerin merkezinden olan uzaklığını, a seçilen yer elipsoidinin büyük yarı eksen uzunluğunu, C_{nm}, S_{nm} n . dereceden ve m . mertebeden harmonik katsayıları, P_{nm} ise Legendre polinomlarını ifade etmektedir.

(4.3) eşitliğinde geçen N derece sayısı GPS uyduları ile yapılan ölçmelerde 8 ile 12 arasında alınarak yerin kütle çekimi sonucu uydunun (r, θ, λ) koordinatları ile verilen bir konumunda oluşturduğu potansiyel hesaplanabilmektedir. (4.3) eşitliğindeki C_{nm} ve S_{nm} katsayıları GPS gözlemleri ile parametre kestirime dahil edilerek de elde edilebilir. Ancak pratikte bu katsayılar sabit olarak alınırlar. Çünkü söz konusu parametreler, GRIM4 geopotansiyel örneğinde olduğu gibi 630 ile 20000 km arası yüksekliklerdeki yörüngelerde hareket eden uydulara, başta uzunluk ölçmesi olmak üzere yapılan çeşitli gözlemlerden parametre kestirimi ile elde edilmiştir (Schwintzer ve diğ., 1997). Doğal olarak ortalama 20200 km yükseklikte yörüngelerde hareket eden GPS uydularından elde edilen gözlemlerle oluşturulacak bir model özellikle uzun dalga boylu bileşenlere karşı duyarlı olmayacaktır. Yer potansiyel modellerinin elde edilmesinde dikkat edilmesi gereken en önemli özellik, bu modellerin yalnızca yersel gravite ölçmeleriyle değil yukarıda belirtildiği gibi uydulara yapılan gözlem verileri de kullanmak suretiyle kullanıma sunulmasıdır. Bu şekilde potansiyelin kısa dalga boylu kısmı yersel, uzun dalga boylu kesimi ise yerin çekim alanında hareket eden uyduların yörüngelerindeki değişimlerden saptanmaktadır. Dünyadaki çeşitli enstitü ve grupların ürettiği ve kullanıcıların hizmetine sunduğu yer potansiyel modellerine örnek olarak EGM96, JGM-3, GRIM5-C1 ve GRIM5-S1 verilebilir (McCarthy, 2002). İlerleyen yıllarda CHAMP, GRACE ve GOCE gibi yere çok yakın yörüngelerdeki uydulara uzunluk, bu uydular arasında SST (Satellite-to-Satellite Tracking) uzunluk ölçmeleri ile ivme gradyeni ölçmelerinden yer potansiyel modelleri için daha iyi sonuçlar elde edilebilecektir (Balmino, 2001).

4.1.2 Uyduya Ayın ve Güneşin Doğrudan Çekim Etkisi

Uydu, yer etrafındaki yörüngesinde dolanımı sırasında ay ve güneşin konumunun zamana karşı değişimi neticesinde değişen potansiyel alanı ile ivmesi de değişim gösterir. Aslında güneş sistemindeki diğer gezegenlerden de teorik olarak etkilenme sözkonusudur. Ancak bu etkilerin pratik bir anlamı yoktur. Modelleme için ay ve güneş, uyduya olan oldukça büyük uzaklıkları nedeniyle yer gibi uzaysal dağılıma sahip bir kütle değil de kütleleri ağırlık merkezlerinde toplanmış noktasal cisimler gibi ele alınarak

$$V_{gel-gir} = \frac{GM_M}{r_M} + \frac{GM_S}{r_S} \quad (4.4)$$

basit potansiyel eşitliği kullanılabilir. (4.4)'de M_M , M_S ay ve güneşin kütlesini, r_M , r_S uydu-ay ve uydu-güneş arasındaki zamana göre değişken uzaklığı göstermektedir. Ay ve güneşin konumları çeşitli efemerislerle belirlenebilir. Bunlardan en önemlisi NASA'ya bağlı JPL (Jet Propulsion Laboratory) tarafından geliştirilen DE/LE403 efemeris bilgileridir (Standish, 1998). Bu katalog yardımıyla yalnızca ay ve güneşin değil güneş sistemindeki diğer gezegenlerin de konumları belirlenebilir. Bu katalogda ay ve güneş ile diğer gezegenlerin kütlelerinin evrensel çekim sabitiyle çarpım değerleri de efemeris verilerine ek olarak yer alır.

4.1.3 Güneş Radyasyon Basıncı

Yeryüzünden yaklaşık 20200 km yükseklikte ortalama 11 saat 58 dakika peryotla dolanan GPS uydularına güneşten gelen fotonların çarpması neticesinde oluşan ve yörüngeyi etkileyen bir kuvvet de etki eder. Bu, güneşin radyasyon etkisi olarak bilinir.

Colombo (1989), tam olarak açıklanamayan ancak modellenemeyen çekim alanı, radyasyon basıncı gibi nedenlerle ortaya çıkan uydu ivme değişiminin basit Fourier serileri ile modellenebileceğini ampirik olarak göstermiştir. Ancak Beutler ve diğ. (1998) bu etkilerin yerçekimi potansiyeli $m=2,4,\dots$ ve derece $n=2,3,4,\dots$ için ortaya çıktığını çünkü uydunun yer etrafında her bir dolanımı sonrası bu terimlerden kaynaklanan bozucu potansiyelin aynı olacağını ifade etmektedirler.

Yörünge iyileştirmesinde yerin çekim alanını temel alan Colombo modeli yüksek presizyonlu yörünge belirleme ihtiyaçlarını karşılamadığından terkedilerek yerine IGS topluluğuna analiz merkezi olarak hizmet eden CODE (Center for Orbit Determination in Europa) tarafından geliştirilen bir modelleme önerilmiştir. Bu model ile daha önce dm doğrulukla belirlenen yörünge koordinatları bugün cm doğruluklarla verilebilmektedir. Geliştirilen bu modelleme **Fliegel ve diğ. (1992)** tarafından geliştirilen ROCK modeliyle bulunan yaklaşık değerleri kullanır. Söz konusu modelde z- eksenini olarak uydu ile güneş arasındaki doğrultu ve güneşe doğru pozitif, y- eksenini aynı şekilde kalarak, x- eksenini ise bu eksenlere dik olarak seçilerek $\vec{e}_x = \vec{e}_z \times \vec{e}_y$ bir koordinat sistemi oluşturulur. Bu durumda ivme

$$\vec{a}_{RPR} = \vec{a}_{ROCK} + D(u)\vec{e}_z + Y(u)\vec{e}_y + X(u)\vec{e}_x \quad (4.5)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlikte geçen u, uydunun argümanı (uydu yörünge düzleminde ekvator ile yörünge düğüm noktasından uydu doğrultusuna olan açı) olmak üzere

$$\begin{aligned} D(u) &= D_0 + D_{Cu} \cos u + D_{Su} \sin u \\ Y(u) &= Y_0 + Y_{Cu} \cos u + Y_{Su} \sin u \\ X(u) &= X_0 + X_{Cu} \cos u + X_{Su} \sin u \end{aligned} \quad (4.6)$$

ile verilir. Buradaki 9 parametre belirli bir aralıkta kestirilmesi gereken parametreler olarak karşımıza çıkmaktadır (**Springer ve diğ., 1999; Beutler ve diğ., 1998**). Bu model GPS uydu yörüngelerinin belirlenmesinde BERNE modeli olarak anılmaktadır.

4.1.4 Yeryuvarı Gravite Alanına Gel-git Etkisi

Güneş ve ayın yeryüzünde noktalarda oluşturduğu çekim kuvvetinin bu noktaların konumlarına bağlı farklı etki göstermesi, yerin dışındaki çekim alanı potansiyelini etkileyeceğinden yerden belirli bir yükseklikte hareket eden uydularda da yer yuvarı gravite alanı değişiminden kaynaklanan ivme değişimleri gözlenecektir. Bu potansiyel değişiminin matematiksel ifadesi ise (4.3) eşitliğinden de görüleceği üzere C_{nm} , S_{nm} harmonik katsayılarının zamanla değişimlerinin modellenmesi şeklinde olacaktır. Harmonik katsayıların sayısal değerlerindeki bu değişim ay ve güneşin

konumuna ve yerin merkezine uzaklığına göre hesaplanmalıdır. Bu değişimin sayısal değerleri **McCarthy (1996)**'de verilen eşitlikle hesaplanabilir

4.2 Uydu Yörüngelerinin İntegrasyonu

4.2.1 Uydu Yörünge Hareketinin Lineerleştirilmesi

Bölüm 4.1.1'de görüldüğü üzere yerin çekim alanı, yerin yoğunluğunun konumun bir fonksiyonu olarak bilinemediğinden harmonik serilerle ifade edilmektedir. Burada $C_{00} = 1$ alınarak diğer terimlerin ihmal edilmesi halinde bu terim yeryuvarının bütün kütesini tek bir noktada toplanmış gibi ifade eder. Bu terimin baskınlığı diğer terimlere nazaran karşılaştırmalı olarak Tablo 4.1'de verilmiştir. Tablo değerleri, yere çok yakın ve uzak olmak üzere iki uydu için söz konusu katsayı veya katsayıların, uydunun ivmesini ne kadar yüzdelikle etkilediğini göstermektedir.

Tablo 4.1 İki uydu için harmonik katsayıların uydu ivmesine etkisi

Uydu	STARLETTE	GPS
Büyük yarı eksen (a)	7330 km	26600 km
C₀₀	99.891	99.991
C₂₀	0.108	0.008
Diğer katsayılar	.001	0.0005

Tablodan yerin kutuplardan basıklığının da bir ölçüsü olan C_{20} katsayısının etkisinin uydunun yörünge yüksekliği arttıkça azaldığına dikkat edilmelidir (**Koçak, 1999**). C_{00} merkezi teriminin bu baskınlık özelliği kullanılarak uydunun yer etrafındaki hareketini yaklaşık olarak ve analitik biçimde belirlemek mümkündür. Bu yaklaşık veya bozunumsuz yörünge belirleme, Kepler Problemi olarak bilinir. Problemin çözümü için (4.1) eşitliğinde bir t zamanında uydunun konumunu bulmak için eşitliğin iki kez entegrasyonunun alınması gerekecektir. Bu durumda

$$\vec{X}(t) = \vec{X}(t_0) + \int_{t_0}^t \dot{\vec{X}}(t_0) d\tau + \iint_{t_0}^t \ddot{\vec{X}}(t_0) d\tau_1 d\tau_2 \quad (4.7)$$

elde edilir. (4.7) şitliğinden kolayca görüleceği üzere iki adet integrasyon sabiti vektörü ortaya çıkmaktadır. Bunlar, bir başlangıç zamanında uydunun konum ve hız

vektörlerinden başka bir şey değildir. Bu problem uydu jeodezisinde başlangıç değer problemi olarak bilinir. Başlangıç değer probleminden başka bir t_1 ve t_2 zamanında uydunun konum vektörlerinin verildiği ve bir t zamanında konumunun arandığı sınır değer problemi bir diğer yöntemidir.

Uyduların, inersiyal bir sistemde koordinatları zamanla büyük değişim gösterdiğinden zamana karşı daha az değişim gösteren Kepler elemanlarına dönüştürmek uygun olacaktır. Vektör cebri kullanarak kartezyen dik koordinatlarda verilen konum ve hız vektörlerinden Kepler elemanlarına dönüşüm (Seeber, 1993)'de verilmiştir. Kepler elemanları

Ω : uydunun güneyden kuzeye geçerken ekvatoru kestiği nokta olan düğüm noktasının açılımı (rektesansiyonu)

i : uydu yörünge düzleminin ekvator düzlemi ile yaptığı eğim açısı

ω : perige (uydunun dünyaya en yakın olduğu nokta) argümanı

v : uydunun, yörünge düzleminde perigeden açısal uzaklığını gösteren gerçek anomali

a : yörünge düzleminin büyük yarı eksen

e : nümerik eksentrisite

olarak bilinir. Uydunun kartezyen dik koordinatlarının Kepler elemanları cinsinden ifadesi

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{a(1+e^2)}{1+e \cos v} \begin{bmatrix} \cos(v+\omega) \cos \Omega - \sin(v+\omega) \sin \Omega \cos i \\ \cos(v+\omega) \sin \Omega + \sin(v+\omega) \cos \Omega \cos i \\ \sin(v+\omega) \sin i \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

biçiminde verilir (Seeber, 1993).

4.2.2 Nümerik İntegrasyon

(4.1) eşitliği ile verilen Newton'un II. Aksiyomunda eşitliğin sol tarafında uyduya etki eden yerçekimi kuvveti, ay ve güneşin çekim kuvveti, güneş radyasyon basıncı

kuvveti ve gel-git etkisiyle oluşan kuvvetler zamanın bir fonksiyonu olacak şekilde alınacak bir yay uzunluğunda (4.7) eşitliğine uygulanarak uydunun bu yay uzunluğunda konumunun değişimi bulunabilir. GPS gözlemlerinin orta ve uzun bazlarda değerlendirilmesinde yörünge belirleme ve parametre tahmini iç içe geçmiştir. Zira gözlemlerden yararlanarak hem uydunun konumu (Kepler elemanları ve güneş radyasyon parametreleri) belirlenecek hem de uydunun konumundan yararlanılarak gözlemler lineerleştirilecektir. Bu yüzden uydu konumlarının, uyduya etki eden kuvvetler göz önüne nümerik integrasyonla hesap edilmesi gerekir. Bu amaçla (4.7) düzenlenerek matris şeklinde gösterilirse

$$\begin{bmatrix} \vec{X} \\ \dot{\vec{X}} \\ \ddot{\vec{X}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{X}(t_0) \\ \dot{\vec{X}}(t_0) \\ \ddot{\vec{X}}(t_0) \end{bmatrix} + \int_{t_0}^t \begin{bmatrix} \ddot{\vec{X}} \\ \ddot{\vec{X}} \\ \ddot{\vec{X}} \end{bmatrix} dt \quad (4.9)$$

elde edilir. Konum ve hız vektörleri bir y vektöründe birleştirilerek (4.9) eşitliği tekrar düzenlenirse

$$y(t_{i+1}) = y(t_i) + \int_{t_i}^{t_{i+1}} \dot{y}(t_i) dt \quad (4.10)$$

olur. (4.10) adi diferansiyel denkleminin nümerik çözümü için tek adım ve çok adım yöntemleri uygulanabilir. Tek adım yöntemlerinde $i+1$. adımda fonksiyon değeri yalnızca i . adımdaki fonksiyon değeri kullanılarak bulunur. Bunlara örnek olarak Euler ve Runge-Kutta-Yöntemi verilebilir. Çok adım yöntemlerinde ise fonksiyonun $i+1$. adımdaki değeri $i, i-1, i-2, \dots, i-m$ noktalarındaki değerler yardımıyla hesap edilir. Bu amaçla başlangıçta $(m+1)$ adet y fonksiyon değerinin verilmesi gerekir ve bunlar tek adım yöntemleriyle kolaylıkla hesaplanabilir. Çok adımda çözüm için Adams-Bashforth ve Adams-Moulton en çok kullanılan yöntemlerden bazılarıdır. Adams-Moulton yönteminde $m+1$ kadar fonksiyon değerine ek olarak y_{i+1} değeri de çözümde kullanılır. Bu durumda doğal olarak iterasyon yapma zorunluluğu vardır. Bu iki yöntemin birleştirilmesiyle prediksyon-düzeltilme yöntemi geliştirilmiştir. Prediksyon aşamasında fonksiyonun $i+1$. nokta için değeri bulunur. Düzeltilme aşamasında ise önceki adımlara ait fonksiyon değerleri ve prediksyon değeri kullanılmak suretiyle aranan y_{i+1} değerine ulaşılabilir (Schwarz, 1997).

4.3 Yer Noktalarının Hareketlerinin Modellenmesi

Bu bölümde, fonksiyonel ve stokastik modellerle kestirilmelerine gerek olmayan, ancak hesaplanarak nokta koordinatlarına düzeltme olarak getirilecek, yani deterministik olarak ele alınacak büyüklüklerden bahsedilecek ve bu düzeltmelerin nasıl hesaplanacağı kısaca açıklanacaktır. Yüksek presizyon gerektiren çalışmalarda bu etkilerin mutlaka gözönüne alınması gereklidir.

4.3.1 Gel-git Düzeltmesi

Yeryuvarı, uzaysal kütle dağılımına sahip bir cisimdir ve bu uzaysal cisim güneş sistemi içinde güneş ve ay başta olmak üzere diğer gezegenlerle etkileşim içindedir. Örnek olarak güneş etrafında dolanan yer, yıllık konumuna (güneşten uzaklığına) bağlı olmak üzere bir merkezkaç kuvvetine maruz kalır. Bu kuvvet yerin bütün noktalarında aynıdır. Güneşin çekim etkisi bir yeryüzü noktasında konumuna bağlı olarak değişim gösterdiğinden söz konusu merkezkaç kuvveti, yeryüzünün merkezi hariç diğer noktalarında güneşin çekim etkisini dengeleyememesi sonucunda artık kuvvetler olarak ortaya çıkarlar. Aynı etki ay için de söz konusudur. Bu artık kuvvetler sonucunda yerin bütün noktalarında bir potansiyel değişimi gözlenir. Yer noktalarında yükseklik bileşeninde kutuplarda -11 ile ekvatorunda +22 cm arasında değişen yükselme ve alçalmalar ortaya çıkar (Wenzel, 1997).

Ayin ve güneşin çekim etkisi sonucu oluşan gel-git olayının yer noktalarına hem doğrudan hem de dolaylı etkisi vardır. Doğrudan etkiler karasal ve okyanusal etkiler olarak bilinir. Okyanusal gel-gitler büyük su kütlelerinin kütle çekimine gösterdiği tepkiyle ilgilidir. Okyanus yüzeylerinin bu çekim etkisiyle yükselip alçalması, kıyı ve kıyıya yakın noktalarda konum değişimlerine neden olmaktadır. Bu tür bir etki de dolaylı etki olarak sınıflandırılır. Gel-git olayının bir noktada ifadesinde yatay ve düşey yönlerdeki yer değiştirmeler ile o noktadaki potansiyel değişimini göstermek üzere Love ve Shida sayılarından yararlanılır. Love sayıları potansiyel değişimini ve düşey yöndeki değişim miktarını ifade etmek amacıyla kullanılır ve genel olarak k ve h sembolleri ile gösterilirler. Shida sayısı gel-git sonucu yeryuvarının bir noktasında yatay yöndeki değişim miktarını modellemede kullanılır. İkinci dereceden zonal harmonikler için yaklaşık değerler $k_2 = 0.3$, $h_2 = 0.6$ ve $l_2 = 0.08$ olmaktadır.

Karasal gel-gitlerin noktanın koordinatlarına etkisi, zaman ve frekans uzaylarında olmak üzere iki adımda düzeltme getirilerek giderilir. Birinci adımda ayın ve güneşin konumuna bağlı olarak değişik derece ve mertebe için verilen Love ve Shida sayıları kullanılarak düzeltme getirilir. İkinci adımda ise Love ve Shida sayılarının frekansla değişimleri de dikkate alınır (McCarthy, 1996). Nokta yüksekliklerinin presizyonlu olarak belirlenmesinin gerektiği çalışmalarda okyanusların yükselme ve alçalmasıyla karalara yaptığı baskı da modellenmelidir. Bu etkiler için Scherneck (1991)'in geliştirdiği algoritmadan yararlanılır.

4.3.2 Levha Tektoniği ve NUVEL-1A Modeli

Alman yerbilimci Alfred Wegener'in temellerini attığı Tabaka tektoniği kavramı 60'lı yılların ortalarından itibaren gelişmeye başlar. Atlantik Okyanusu tabanındaki yarıklardan, bu yarıklara dik yönde okyanus tabanına doğru yayılan magmanın milyonlarca yıldan beri yanal bir biçimde yığılması bu teorinin ortaya çıkmasına ait en büyük doğal tasarım örneği teşkil etmektedir. Teoriye göre yer kabuğu kalınlığı okyanusda daha az, karada daha çok olan büyük plakalardan meydana gelmiştir. Bu plakalar manto adı verilen alt katman üzerinde kaymakta ve dolayısıyla birbirleriyle sürekli olarak etkileşim içinde bulunmaktadır. Plaka sınırlarında olan bu etkileşimler genel olarak üç türdür:

1. Konvergent sınırlar
2. Divergent sınırlar
3. Transform sınırlar

Teoride en büyük varsayımlardan birisi plakaların kendi içinde stabil olmasıyla ilgilidir. Bu durum Kuzey Amerika, Avrasya, Pasifik ve Avusturalya plakaları için Argus ve Gordon (1996)'un çalışmasıyla VLBI (Very Long Baseline Interferometry) kullanılarak pratik olarak da test edilmiştir.

Konvergent sınırlar Pasifik okyanus bloğunun, Güney Amerika kıta bloğunun altına doğru batması örneğinde olduğu gibi litosferin kaybedilmesiyle oluşan tektonik aktiviteler olabileceği gibi litosferin, daldığı ortamın yoğunluğundan daha az olduğu, dolayısıyla korunduğu jeolojik olaylar da olabilir. İkinci olay, Hindistan bloğunun Avrasya plakasına çarpması sonucu oluşan Himalayalar'da gözlenir. Divergent

sınırlarda jeolojik olaylar yüzen iki plakanın ayrışmasıyla ilgilidir ve buna ait en güzel örnek Atlantik Okyanusu'nun ortasından geçen yarık gösterilebilir. Transform sınırlarda ise plakalar birbirlerine göre yanal ve düşey yönlerde olmak üzere bağlı hareketler yapmaktadırlar. Türkiye'de milyonlarca yıldır deprem üreten Kuzey Anadolu Fayı da yanal atımlı transform bir fay özellikleri gösterir. Tektonik süreçler **Kearey ve Vine (1996)**'da ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Yukarıda da özetlendiği gibi yer dinamik bir değişim içerisindedir. Bu değişim doğal olarak nokta konumlarını da etkilemektedir. Bunun sonucunda yeryüzünde bir noktanın konumu yalnızca konum parametreleri ile verilmeyip bunlara ek olarak bu parametrelerin zamana karşı değişim miktarları verilmelidir. Yani yeryüzünde bir nokta, konumu ve hızı ile bir sistemde ifade edilmelidir. Matematiksel olarak;

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_t = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{t_0} + (t - t_0) \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_{t_0} \quad (4.11)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu amaca hizmet etmek üzere nokta hızları jeodezik yöntemlerle belirlenebileceği gibi jeolojik ve jeofizik yöntemlerle de belirlenebilir. Bunun için 70'li yıllardan itibaren çeşitli modeller geliştirilmiştir. Bunlardan en yenisi 1994 yılında son şeklini alan ve yayımlandığı 1990 yılında verilen hız vektörlerinin bir ölçek katsayısı ile çarpılarak yeniden verildiği NUVEL-1A'dır (**DeMets ve diğ., 1990; DeMets ve diğ., 1994**). NUVEL-1A modeli öncülerine kıyasla daha fazla gözlem verisi içerdiğinden gerçeğe en yakın olan levha tektoniği modelidir. ITRF2000 gibi modern uzay jeodezisi metodları kullanılarak elde edilen son yersel referans ağı ile bulunan nokta hızları ile NUVEL-1A hızları arasında maksimumda 3 mm/yıl gibi farklar bulunmuştur. Bu çalışmanın 6. bölümünde de görüleceği üzere nokta hızlarının mm altı doğruluklarla kestirilebildiği günümüzde 3 mm/yıl anlamlı olmaktadır. Sonuç olarak hala yersel referans ağlarının eksenlerinin değişim oranını sabitlemekte kullanılan NUVEL-1A modelinin gerçeği yansıtmadığı söylenebilir (**Altamimi ve diğ., 2002b**).

5. FREKANS VE ZAMAN-FREKANS ANALİZİ

Verilerin veya sinyallerin zaman uzayında ard arda sıralanmasına zaman serisi denilmektedir. Zaman serileri tek boyutlu sinyaller olarak sınıflandırılırken iki boyutlu sinyallere örnek olarak sayısal görüntüler verilebilir. Bu çalışmada tek boyutlu zaman serileri inceleme konusu olacaktır. Genel olarak çok geniş bir içeriğe sahip olan sinyal analizi kavramının yalnızca bu çalışma için gereksinim duyulacak konuları ele alınacaktır. Öncelikle zaman serilerinin frekans uzayında analizi için gerekli olan Fourier dönüşümü ele alınacak, bunu serilerin evrişimi, süzgeçlenmesi ile spektrum hesabı ve serilerin korelasyonu konuları izleyecektir. Daha sonra Fourier dönüşümünden farklı olarak serilerin zaman-ölçek uzayında çeşitli analizlerinde kullanılan sürekli ve ayrık (diskret) wavelet dönüşümlerinin algoritması açıklanacak ve zaman serilerine uygulaması örneklerle incelenecektir.

5.1 Fourier Dönüşümü

Zaman uzayında $-\infty < t < \infty$ aralığında tanımlı bir $x(t)$ fonksiyonu verilmiş olsun.

Bu fonksiyon, periyodik fonksiyonlarla

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) [a_f \cos(2\pi ft) + b_f \sin(2\pi ft)] dt \quad (5.1)$$

biçiminde ifade edilebilir. (5.1) eşitliğinde $y(t)$, $x(t)$ fonksiyonunun Fourier serisi olarak isimlendirilir. Eşitlikte geçen f frekans, a_f ve b_f ise Fourier katsayıları olarak bilinir. Karmaşık sayıların kullanılmasıyla

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (5.2)$$

$x(t)$ zaman serisinin frekans ortamı görünümü olarak bilinir. $i = \sqrt{-1}$ olmak üzere eşitliğin sağ tarafında geçen üstel fonksiyon

$$e^{-i2\pi ft} = \cos(2\pi ft) + i \sin(2\pi ft) \quad (5.3)$$

biçiminde tanımlanır. (5.2) eşitliği,

$$X(f) = |X(f)| e^{i\phi(f)} \quad (5.4)$$

biçiminde de ifade edilebilir. Eşitlikte geçen

$$|X(f)| = \sqrt{a_f^2 + b_f^2} = \sqrt{X(f) \times X^*(f)}$$

genlik spektrumunu,

$$\phi(f) = \arctan \frac{b_f}{a_f}, \quad a_f \neq 0$$

ise faz spektrumunu ifade etmektedir. Zaman uzayında verilen her sonlu değerli fonksiyon, frekans uzayında (5.2) ile ifade edilebilir. Aynı şekilde frekans uzayında verilen $X(f)$ kullanılarak

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{i2\pi ft} df \quad (5.5)$$

zaman uzayındaki $x(t)$ 'yi elde etmek mümkün olup bu işleme ters Fourier dönüşümü denir. Bir seriye ait zaman ve frekans uzaylarındaki gösterimi arasında geçiş yapmak (5.2) ve (5.5) eşitlikleri ile mümkündür. Bu özellik, ilerleyen kısımlarda ele alınacak ve sinyal analizinde sıklıkla kullanılan süzgeçleme, korelasyon gibi kavramlar için oldukça önemlidir.

(5.2) eşitliğiyle frekans spektrumunun hesaplanması için elde sonsuz uzunlukta veri bulunması varsayımından hareket edildi. Ancak böyle bir durum pratikte söz konusu olmadığından incelemesi yapılacak sinyal sonlu uzunlukta bir sinyal olarak

düşünülebilir. $x(t)$ fonksiyonu (5.1)'de verildiği gibi $[0, 2\pi]$ aralığında trigonometrik $\sin$ ve $\cos$ fonksiyonların toplamı cinsinden

$$x(t + 2\pi) = x(t) \quad x(t) \in \mathfrak{R} \quad (5.6)$$

olmak üzere,

$$g_n(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^n \{a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt)\} \quad (5.7)$$

biçiminde Fourier serisi olarak yazılabilir. (5.7)'de geçen a_k ve b_k bilinmeyen Fourier katsayılarını göstermektedir. n uzunluğundaki bu $f(x)$ fonksiyonu veya serisi için a_k ve b_k katsayıları, en küçük kareler yöntemine göre tahmin edilmek istendiğinde

$$\left[\int_{-\pi}^{\pi} \{g_n(t) - x(t)\}^2 dt \right] = \int_{-\pi}^{\pi} \left[\frac{1}{2} a_0 + \sum_{k=1}^n \{a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt)\} - x(t) \right]^2 dt = \min. \quad (5.8)$$

yazılarak üstel fonksiyon açılır ve gerekli işlemler yapılırsa minimum koşulunu sağlayan Fourier katsayıları

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(t) \cos(kt) dt \quad (k = 0, 1, \dots, n) \quad (5.9a)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x(t) \sin(kt) dt \quad (k = 1, \dots, n) \quad (5.9b)$$

olarak elde edilir (Schwarz, 1997). Uygulamada sonlu sayıda veri ile çalışıldığından (5.9) eşitliğinde integral yerine toplama işareti konularak ayrık gözlemler için Fourier katsayıları

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i) \cos(kt_i) \quad (k = 0, 1, \dots, n) \quad (5.10a)$$

$$b_k = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i) \sin(kt_i) \quad (k = 1, \dots, n) \quad (5.10b)$$

biçiminde bulunur. (5.10a) eşitliğinden $x(t)$ zaman serisinin g_n Fourier serisi ile ifadesinde $k=0$ ile ilk terimin serinin ortalamasının yarısı olduğu görülmektedir. Dolayısıyla spektrum hesabında ilk terimden sonraki katsayılarla ilgilenilir. (5.7)'den, belirlenen Fourier katsayılarının trigonometrik fonksiyon bileşenlerinin bir anlamda ağırlıklarını da ifade ettiği söylenebilir. Yani ele alınan spektrumda herhangi bir frekans değerinin ne kadar baskın olduğu bu katsayılarla ifadesini bulur. (5.7) eşitliğinden çıkarılabilecek bir başka yorum, katsayıların fonksiyon değerleri ve trigonometrik elemanlar arasında benzerliği ifade ettiği şeklindedir.

(5.9) veya (5.10) eşitlikleriyle Fourier katsayılarını hesaplayabilmek için $x(t)$ zaman serisinin tanımlı olduğu aralık $[0, 2\pi]$ arasında aşağıdaki ortogonallik eşitliklerinden yararlanılır. Ortogonallik eşitlikleri

$$\int_0^{2\pi} \cos 2\pi f_j t \cos 2\pi f_k t dt = \begin{cases} 0 & j \neq k \\ 2\pi & j = k = 0 \\ \pi & j = k > 0 \end{cases}$$

$$\int_0^{2\pi} \sin 2\pi f_j t \sin 2\pi f_k t dt = \begin{cases} 0 & j \neq k, j, k > 0 \\ \pi & j = k > 0 \end{cases}$$

$$\int_0^{2\pi} \cos 2\pi f_j t \sin 2\pi f_k t dt = 0 \quad j \geq 0, k > 0 \quad (5.11a, b, c)$$

biçimindedir (Schwarz, 1997). Fourier katsayılarının hesaplanmasında (5.10) eşitliğinden de görüleceği üzere tek bir a_k katsayısı için N çarpım ve $N-1$ de toplama işlemi yapılması gerekir. Bütün katsayıların belirlenmesi için N^2 çarpım ve $N \times (N-1)$ de toplama işlemi gereklidir. N sayısının artmasıyla işlem zamanı da artacağından pratikte FFT (Fast Fourier Transform) olarak bilinen algoritma ile çok büyük bir veri kümesinin spektrumu kısa zamanda çözülebilmektedir. FFT, 2'nin katı boyuta sahip verilerden spektrum hesabı yapar. Veri boyutu böyle bir özellik göstermiyorsa sıfırla

genişletme (zero-padding) algoritması kullanılarak veri 2'nin katı olacak şekle getirilir (Brigham, 1988; Press ve diğ. 1999).

5.1.1 Sinyallerin Örneklenmesi

Teorik olarak sürekli sinyallerle çalışmak mümkündür. Ancak gerçek dünyada insan gözü de dahil olmak üzere sürekli dünyayı sürekli olarak algılayabilen bir sistem yoktur. Sürekli sinyaller yerine pratikte ayrık verilerle çalışılır. Verilen sürekli bir sinyalin, genelde eşit aralıklı olmak üzere seçilen konumlarda sinyal değerleri kaydedilir. Seçilen bu sayısallaştırma aralığına örnekleme aralığı denir. Örnekleme aralığı, incelemesi yapılacak sinyalden anlamlı yorumlamalar yapmak için önemli rol oynamaktadır. Örnek olarak bir sinüs dalgası ele alınsın. Bu sinyalin tekrar oluşturulabilmesi için en az iki ayrı konumda sayısallaştırma veya örnekleme yapılmalıdır. Sinyalin hep maksimum ve minimum değerleri örnekleme için seçilebilir (Press, 1999). Böylelikle sinyalin genliği ile bu iki değer arasında faz açısı bilindiğinden sinüs eğrisi yeniden elde edilebilir. Verilen örnekte olduğu gibi ayrık bir seride mevcut en büyük frekans f ile örnekleme aralığı arasında Δ arasında

$$f < f_c = \frac{1}{2\Delta}$$

bağıntısı olmalıdır. Burada f_c 'e Nyquist frekansı denir. Yukarıda verilen eşitliğin sözle ifadesi ise: Sürekli bir sinyalin ya da serinin yeniden elde edilebilmesi için örnekleme aralığı frekansı, seride mevcut en büyük frekansın en az iki katı büyüklükte seçilmelidir. Bu, sinyal analizinde örnekleme kuramı veya Nyquist kuramı olarak da bilinir. Eşik frekansın altında örnekleme durumunda seride frekans katlanması olayı (aliasing) gözlenir ve sinyal bir defa örneklendikten sonra geri dönüş mümkün değildir.

5.1.2 Evrişim

Bu çalışmada seride yer alan sinyallerin birbirleri ile bağımlılıkları incelenecek ve onlara süzgeçler uygulanacaktır. Süzgeçleme ve korelasyon, bir üst başlık olan evrişim ile açıklanabilir.

İki farklı sinyal $x_1(t)$ ve $x_2(t)$ 'in zaman uzayında evrişimi matematiksel olarak

$$y(t) = x_1(t) * x_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(\tau) x_2(t - \tau) d\tau \quad (5.12)$$

ile verilir. (5.12)'nin, (5.2) eşitliğinde olduğu gibi Fourier dönüşümü teşkil edilirse

$$\int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-i 2\pi f t} dt = Y(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(\tau) \left[\int_{-\infty}^{\infty} x_2(t - \tau) e^{-i 2\pi f t} dt \right] d\tau \quad (5.13)$$

eşitliği elde edilir. Eşitliğin sağ tarafında $\sigma = t - \tau$ alınarak t yalnız bırakılırsa $t = \sigma + \tau$ köşeli parantez içindeki işlem

$$\int_{-\infty}^{\infty} x_2(\sigma) e^{-i 2\pi f (\sigma + \tau)} d\sigma = X_2(f) e^{-i 2\pi f \tau} \quad (5.14)$$

şeklini alır. (5.14) eşitliği (5.13)'de yerine konulacak olursa

$$\int_{-\infty}^{\infty} x_1(\tau) X_2(f) e^{-i 2\pi f \tau} d\tau = X_1(f) X_2(f) \quad (5.15)$$

şeklinde elde edilir. Buradan iki fonksiyonun evrişimi yani integral altında çarpımı, bu fonksiyonların fourier spektrumlarının çarpımına eşit olduğu görülmektedir. Bu, sinyal analizi için önemli bir çıkarımdır. Çünkü iki zaman serisiyle zaman uzayında yapılacak bir işlem, integral veya toplam işareti altında yapılacakken bu serilerin Fourier spektrumu oluşturularak spektrumlarının çarpımı ile işlem daha kolay olarak gerçekleştirilecektir. (5.12) evrişim eşitliği iki fourier spektrumu için uygulanacak olursa

$$X_1(f) * X_2(f) = x_1(t) x_2(t) \quad (5.16)$$

olduğu gösterilebilir (**Brigham, 1988**).

5.1.3 Korelasyon Teoremi

İki fonksiyonun korelasyonu (çapraz korelasyonu) evrişim teoremine benzer olarak

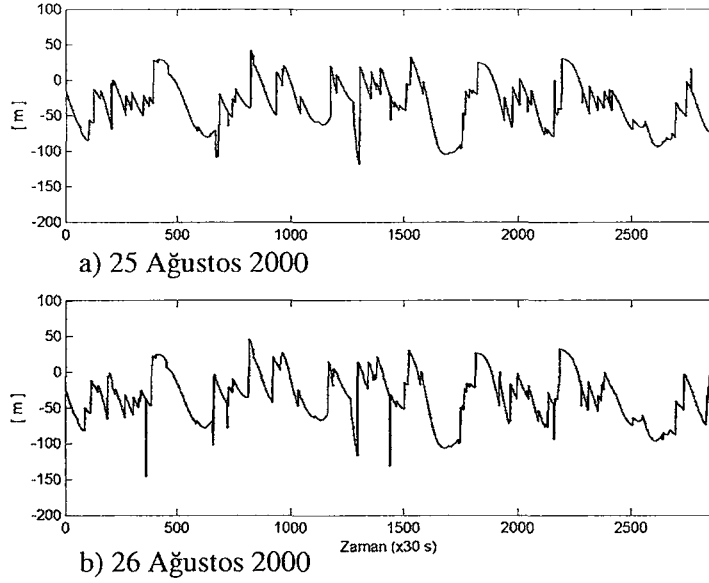
$$z(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} x_1(t) x_2(t + \tau) dt \quad (5.17)$$

şeklinde tanımlanır. Burada τ , kayma değerini göstermektedir. τ , sıfır olabileceği gibi herhangi bir zaman ötelemesini ifade etmek için kullanılmıştır. Korelasyon ile istatistikteki anlamında olduğu gibi birden fazla sinyal vektörünün birbirleriyle ilişkisi araştırılabilir. Farklı iki sinyalin karşılaştırılmasına çapraz korelasyon, aynı sinyalin kendi elemanlarının karşılaştırılmasına ise otokorelasyon denir.

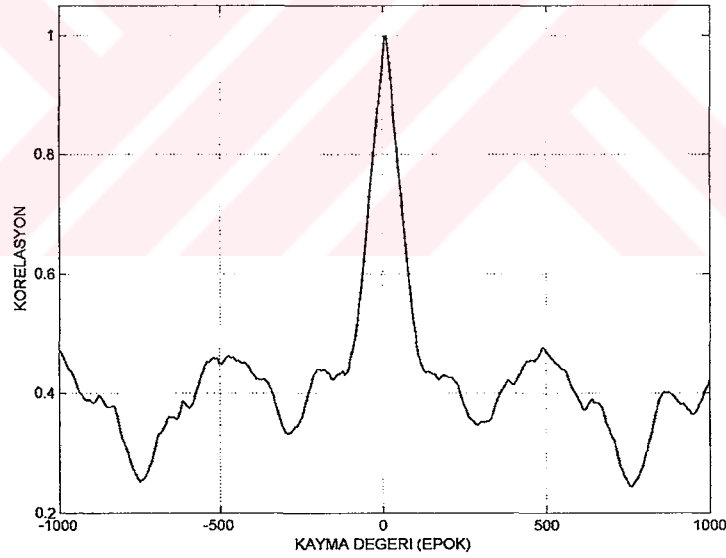
Çapraz korelasyona örnek olarak IGS ISTA (İstanbul) sabit istasyonunda iki ardışık gün için istasyonda kaydedilen GPS P2 kod gözlemlerinin navigasyon çözümlerinin karşılaştırılması örnek olarak verilebilir. Gözlemler, 30 saniye aralıklı her epok için ayrı ayrı ele alınarak değerlendirilerek Şekil 5.1’de görülen noktanın Z bileşene ait zaman serileri elde edilmiştir. Düşey eksen, noktanın dengeleme sonucunda bulunan bilinmeyen değerini göstermektedir. Şekle bakıldığında benzerlik oldukça net bir şekilde gözle de görülmektedir. Sayısal olarak gerçekten böyle bir benzerliğin olup olmadığı hesaplanacak çapraz korelasyon ile bulunabilir. Şekil 5.2 bu iki serinin gerçekten benzer olduğunu göstermektedir. İki serinin karşılaştırılmasından bir başka ilginç sonuç olarak serilerin 8 epok kayıklıkla birbirlerine benzedikleridir. 8 epok 240 saniyeye karşılık gelir ve bu da ancak uydu konfigürasyonu ile açıklanabilir. Bilindiği üzere GPS uyduları yer etrafında iki tam dolanımını yıldız zamanı biriminde 1 tam günde yaparlar. 1 yıldız gününün de güneş gününden yaklaşık 4 dakika daha kısa olduğu göz önüne alınırsa bir noktada belirli bir günde gözlenen uydu konfigürasyonu ertesi gün, bir önceki güne nazaran 4 dakika önce tekrarlar.

5.1.4 Süzgeçleme

Bir zaman serisi Fourier dönüşümüne tabi tutulduğunda elde edilecek spektrumda küçükten büyüğe doğru sinyale katkı veren frekanslar sıralanır. Jeodezik anlamda düşünüldüğünde sinyallerdeki periyodik etkiler sinyalin de türüne bağlı olmak üzere genelde yüksek frekanslıdır. Çünkü jeodezik çalışmalarda kaba hatalı ve



Şekil 5.1 ISTA GPS kod çözümlerinden üretilen Z bileşenleri



Şekil 5.2 25 Ağustos ve 26 Ağustos çözümlerinin maksimum korelasyon değerine göre normlandırılmış çapraz korelasyonu

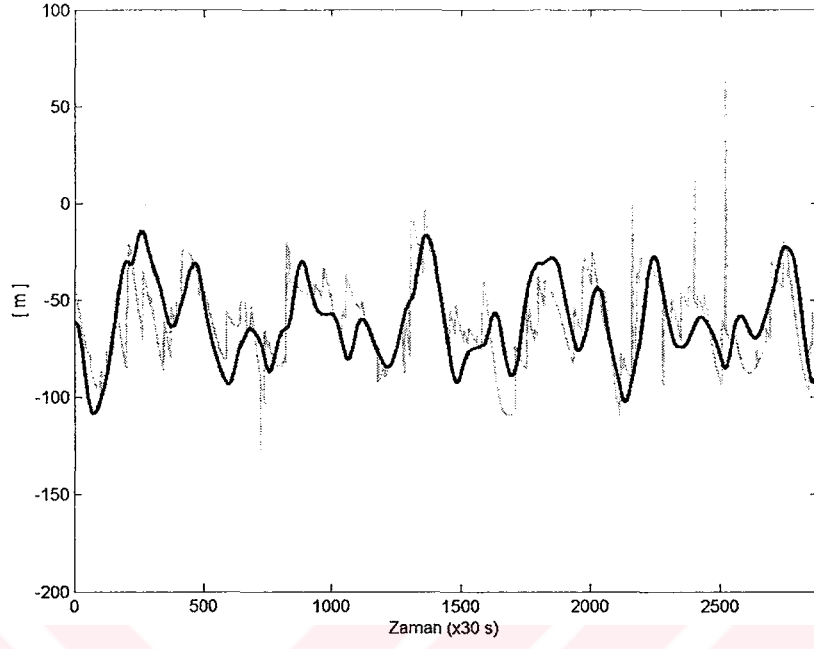
sistematiik hatalar dışında hep rastlantısal verilerle çalışılır. Ya da gözlemlerin rastlantısal olduğu varsayımı yapılır. Rastlantısal özelliğe sahip olan ve gürültü olarak isimlendirilen sinyaller yüksek frekanslıdır, yani çok tekrarlanır. Bu durumda; anlamlı periyodiklik gösteren sinyaller ile örnek olarak istatistiksel hata analizleri yapmak, parametre kestiriminde kayıklığa (bias) neden olabileceğinden yüksek

frekanslı sinyaller ile analiz yapılmalıdır. Düşük ve yüksek frekanslı sinyal kavramının daha iyi anlaşılabilmesi için somut bir örnek gravimetriden verilebilir. Örnek olarak sabit bir istasyonda yapılan sürekli gravite ölçümlerinde yüksek frekanslı sinyaller, daha düşük frekanslı gel-git sinyallerinin etrafında kümelenirler. Bu sinyaller, gravimetrenin sayısallaştırma aracının elektronik sistemine gelen sinyalin, sistemin gürültüsünden ayırt edilemediği yüksek frekanslı sinyal durumlarında ortaya çıkarlar ve rastlantısal karakterde ölçü hatalarıdır. Sabit noktadaki gravite değerini bulabilmek için düşük frekans geçişine izin veren süzgeçleme yapılarak düşük frekanslı gel-git etkileri seriden elimine edilir..

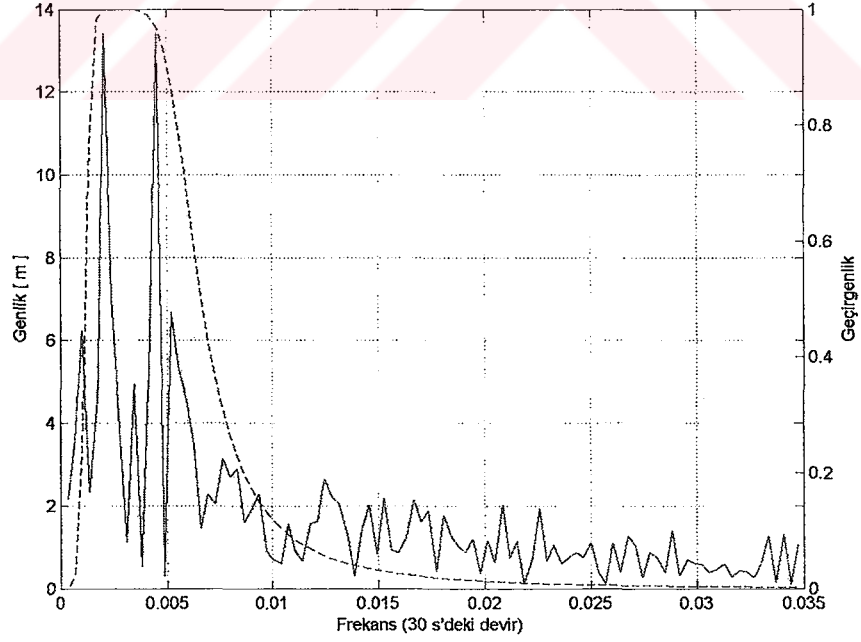
Yukarıda verilen örnekler ışığında bir süzgecin ne olduğunu matematik olarak açıklamak için ISTA istasyonunun Şekil 5.3’de verilen GPS navigasyon çözümü X bileşeni alınabilir. Bu serinin (5.2) ile hesaplanacak fourier spektrumu Şekil 5.4’de görülmektedir. Şekilden Fourier dönüşümüyle elde edilen güç spektrumunda serinin düşük frekanslı bileşenlerinin, spektruma katkısının daha yoğun olduğu görülmektedir. Spektrum, özellikle iki noktada maksimumu göstermektedir. Bunlar 4 saat ve 1 saat 50 dakika periyotlarına karşılık gelmektedir. Serinin genel gidişini görmek amacıyla serinin yüksek genlikli bu bölgesine ait sinyalleri geçirip daha yüksek frekanslı değerlerin geçişini engelleyen bir pencere tanımlanarak seri süzgeçlenebilir. Bu pencere fonksiyonuna örnek olarak Butterworth süzgeci verilebilir ve böyle bir süzgeç Şekil 5.4’de kesikli çizgilerle gösterilmiş olup şeklin sağ tarafında 0 ile 1 arasındaki değişimleri (geçirgenlikleri) çizilmiştir. Serinin frekans spektrumu bu pencere fonksiyonu ile çarpılırsa sinyal düşük frekans geçişli olarak süzgeçlenmiş olur. Süzgeçlenen sinyal Şekil 5.3’te koyu renkli olarak gösterilmiştir.

5.1.5 Eşit Aralıklı veya Ardışık Olmayan Serilerde Güç Spektrumu (Lomb-Scargle Periodogramı)

Şimdiye kadar Fourier dönüşümü yapılabilmesi için verilerin eşit aralıkta veya ardışık olarak verildiği varsayımından hareket edildi. Ancak pratikte her zaman böyle ideal duruma raslanmaz. Örneğin GPS sabit istasyonlarında alıcı, anten kaynaklı ya da başka nedenlerle veri kesilmesi olabilmektedir. Bunun sonucunda söz konusu istasyonda o güne ait çok kötü doğruluklu ve zaman serisinden diğer çözümlerle karşılaştırıldığında değerlendirme dışı tutulması gereken bir çözüm ortaya çıkmakta



Şekil 5.3 ISTA navigasyon çözümü X zaman serisi



Şekil 5.4 ISTA navigasyon çözümü X zaman serisinin frekans spektrumu

bazen de hiç çözüm üretilmemektedir. Dolayısıyla seride ardışık çözümden bahsetmek mümkün olmamaktadır. Çözüm olmayan günler sayısı ya bütün seri içinde yüzde olarak çok az bir kesimi oluşturmakta ya da uzun bir süre istasyonun faal olmaması dolayısıyla fazla sayıda veri eksikliği görülebilmektedir. Seride eksik veri blokları olması durumunda ne yapılacaktır? Çözüm olmayan nokta için bir önceki çözüm değeri aynen alınabilir veya ilgili noktaya ait değeri interpolasyon ile elde etme yoluna gidilebilir. Enterpolasyona başvurmadan mevcut zaman serisi ile eşit aralıklı veya ardışık olmayan zaman serilerinin frekans spektrumu Lomb-Scargle algoritması kullanılarak da hesaplanabilir. Örnek olarak bir f_k frekansı için zaman serisi

$$x(t_j) + v_j = a_k \cos(2\pi f_k t_j) + b_k \sin(2\pi f_k t_j) \quad j = 0, 1, \dots, n-1 \quad (5.18)$$

gözlem eşitliği yazılarak birim ağırlıklı seri elemanları varsayımıyla en küçük kareler yöntemi uygulanırsa aranan a_k ve b_k

$$\underbrace{\begin{pmatrix} \sum_{j=1}^n \cos^2(2\pi f_k t_j) & \sum_{j=1}^n \cos(2\pi f_k t_j) \sin(2\pi f_k t_j) \\ \text{simetrik} & \sum_{j=1}^n \sin^2(2\pi f_k t_j) \end{pmatrix}}_{\mathbf{N}_s} \begin{pmatrix} a_k \\ b_k \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \sum_{j=1}^n x(t_j) \cos(2\pi f_k t_j) \\ \sum_{j=1}^n x(t_j) \sin(2\pi f_k t_j) \end{pmatrix}}_{\mathbf{n}_s} \quad (5.19)$$

$$\begin{pmatrix} a_k \\ b_k \end{pmatrix} = \mathbf{N}_s^{-1} \mathbf{n}_s \quad (5.20)$$

normal denklem sisteminin çözümüyle bulunabilir (**Lomb, 1976**). (5.19)'da matrisin köşegen dışındaki elemanı, (5.11c) eşitliğinde olduğu gibi ardışık gözlemler söz konusu olmadığından sıfıra eşit olmayacaktır. Ardışık bir sinyalin bir f_k frekansı için güç spektrumu, (5.2) eşitliği kullanılarak

$$P(f_k) = \frac{1}{N} \left| \sum_{j=0}^{N-1} x(t_j) e^{-i2\pi f_k t_j} \right|^2 \quad (5.21)$$

olarak tanımlandığından (5.19) ve (5.20) ile (5.21) güç spektrumu ya da periyodogramı

$$P(f_k) = \mathbf{n}_s^T \mathbf{N}_s^{-1} \mathbf{n}_s \quad (5.22)$$

biçiminde bulunabilir (Lomb, 1976). Lomb, (5.18) eşitliğinin

$$x(t_j) + v_j = a_k \cos 2\pi f_k(t_j - \tau) + b_k \sin 2\pi f_k(t_j - \tau) \quad j = 0, 1, \dots, n-1 \quad (5.23)$$

şeklinde bulunacak bir τ değeri kullanılarak yeniden yazılması durumunda (5.19)'da verilen eşitliğin sol tarafındaki matrisin köşegen bir matris halini alabileceğini göstermiştir. Bu şekilde bulunacak periyodogram

$$P(f_k) = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\left[\sum_{j=1}^n x(t_j) \cos 2\pi f_k(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^n \cos^2 2\pi f_k(t_j - \tau)} + \frac{\left[\sum_{j=1}^n x(t_j) \sin 2\pi f_k(t_j - \tau) \right]^2}{\sum_{j=1}^n \sin^2 2\pi f_k(t_j - \tau)} \right\} \quad (5.24)$$

basit bir fonksiyon olarak kapalı biçimde ifade edilebilir. Yukarıda tanımlanan τ değeri

$$\tan(4\pi f_k \tau) = \frac{\sum_{i=1}^n \sin(4\pi f_k t_i)}{\sum_{i=1}^n \cos(4\pi f_k t_i)} \quad (5.25)$$

olarak köşegen terimin sıfır olma şartından elde edilir (Scargle, 1982).

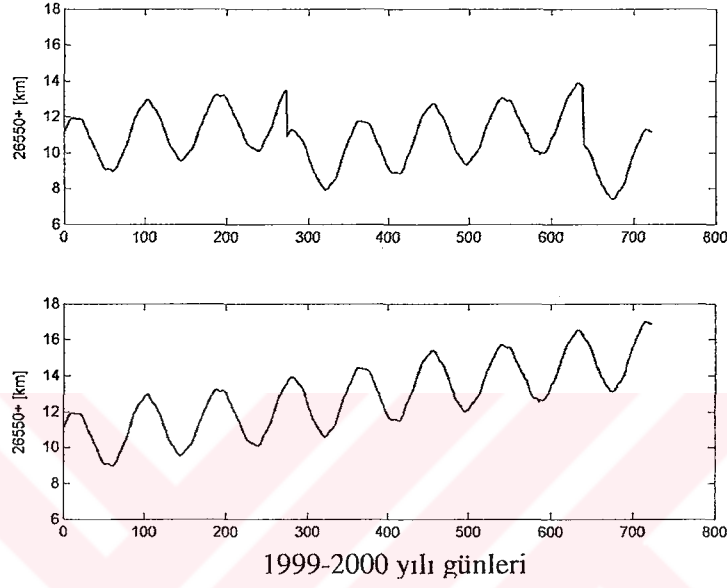
5.2 Zaman-Frekans Analizi

Bir fonksiyonun frekans uzayına dönüşümü, o fonksiyonun periyodik özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Zaman uzayında görülemeyen veya seçilemeyen periyodiklikler ya da periyodunun sayısal olarak hesaplanması istenen gözlemlerin Fourier dönüşümüne tabi tutularak istenen analizleri yapılabilir. Fourier

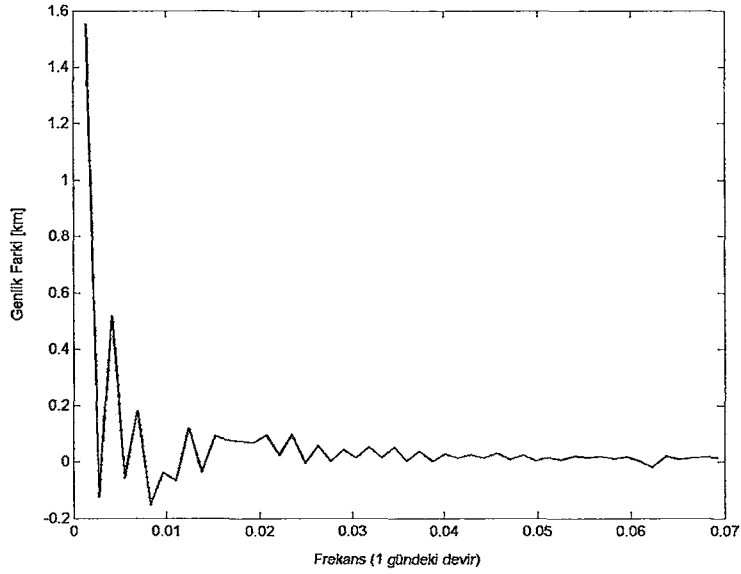
dönüşümü, periyodik özelliklere sahip sinyallerin analizinde tercih edilen bir yöntem olmaktadır. Ancak Fourier dönüşümü için incelenecek sinyalin ergodiklik özelliğini sağlaması istenir. Ergodiklik, sinyalin veya serinin istatistiksel özelliklerinin zamanla değişim göstermemesi yani durağan olması anlamına gelir (**Koch ve Schmidt, 1994; Papoulis ve Pillai, 2002**). Ancak uzun bir sinyal düşünülürse ve bu sinyalin bir kesiminde sinyalin genel gidişine ters düşen bir sıçrama veya süreksizlik olursa serinin ergodik olması söz konusu olamayacağından Fourier dönüşümü ile elde edilecek frekans bileşenleri değişecektir. Örnek olarak PRN25 numaralı GPS uydusunun Kepler elemanlarından büyük yarı eksenin zamanla değişimini veren Şekil 5.5 incelensin. Uydunun büyük yarı eksen bileşeni, 1999 ve 2000 yıllarına ait SP3 formatındaki hassas yörünge verisinden her gün için hesaplanmıştır. Şekilden iki noktada sıçramalı değişim görülmektedir. Bu sıçramalar, uydu yörüngesine ana kontrol istasyonu tarafından yapılan müdahale nedeniyle ortaya çıkmaktadır. Şekil 5.5b’de, sıçramaların bir an için olmadığı varsayımıyla büyük yarı eksenin değişimi gösterilmiştir. Her iki seriye Fourier dönüşümü uygulanarak bulunan genlik spektrumlarının farkı Şekil 5.6’da görülmektedir. Özellikle düşük frekanslı kesimde her iki spektrum arasında oldukça büyük farklar vardır. Bu örnekten zaman uzayındaki sinyalleri frekans uzayına aktaran Fourier dönüşümünün serideki ani değişimlere duyarsız olduğu sonucu çıkmaktadır.

Fourier dönüşümü, bir serideki frekans değişimlerini incelemek için önemli bir araçtır. Ancak Şekil 5.5 ve 5.6’da görüldüğü gibi zaman uzayında sıçramalar olması durumunda elde edilecek spektrum yanıltıcı yorumlara götürebilecektir. Bir başka problem bu sıçramaların zaman uzayında konumlarının belirlenmesidir. Verilen örnekte sıçramalar, gözle açık bir şekilde görülebilmektedir. Ancak yukarıda verilen örnekte olduğu gibi değişimlerin gözle görülemeyebileceği durumların da ortaya çıkarılabilmesi için sayısal sonuçlar üretilmelidir. Bir başka problem sıçramaların ani değil de uzun periyotlu bir özellik göstermesi durumudur. Yani serinin bütünü göz önüne alındığında serinin bir kesiminde genel gidişe zıt bir trendin bulunmasıdır. Sözü edilen problemlerin çözümü için birçok alanda uygulama bulan Wavelet (Dalgacık) dönüşümü kullanılabilir. Wavelet, ele alınan seriyi hem frekans hem de zaman uzayında inceleme olanağı vermekte ve serideki ani ve uzun periyotlu süren değişimleri ortaya çıkarmakta kullanılabilir. Ayrıca genel gidişini görmek için yüksek frekanslı bileşenlere sahip bir seriyi süzgeçleyebilme özelliğine de sahiptir.

Sinyallerin analizinde Fourier dönüşümünün tüm sinyal için değil küçük bir pencerede uygulandığı STFT (Short-Time Fourier Transformation) de kullanılabilir. Ancak STFT serideki çok büyük ve çok küçük frekanslı sinyallerin analizi için uygun değildir (Chui, 1992; Kumar ve Georgiou, 1994).



Şekil 5.5 PRN25 uydusunun yörünge büyük yarı eksen değişimleri



Şekil 5.6 Şekil 5.5’de verilen serilerin frekans spektrumları farkı

5.2.1 Sürekli Wavelet Dönüşümü

Zaman serilerinin wavelet analizi ile serinin belirli zaman dilimlerinde değişimini veya davranışını görmek mümkündür. Bu şekilde serinin hem zamansal hem de periyodiklik özellikleri hakkında fikir edinilebilir. Wavelet analizinin en önemli özelliklerinden biri zamansal anlamda değişimin ortaya çıkarılmasıdır ve bu işlem lokalizasyon olarak da isimlendirilir.

Bir fonksiyonun Wavelet dönüşümü

$$w_{\psi}x(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (5.26)$$

eşitliği ile verilir (Louis ve diğ., 1998). Eşitlikte geçen $\psi(\cdot)$, fonksiyonu tanımlanan waveleti, $x(t)$ zaman serisini ve w_{ψ} de verilen fonksiyonun wavelet dönüşümünü göstermektedir. (5.26) eşitliğinde geçen a ve b , wavelet ile uygulamaların belirtilen özelliğini, yani frekans ve zaman uzayında analizi mümkün kılan parametreleri göstermektedir. Wavelet fonksiyonu ψ , t ekseninde b uzunluğu kadar kaydırılarak ve a ile ölçeklendirilerek ilgilenilen $x(t)$ serisinin incelemesi yapılır. Seçilen ψ fonksiyonunun aşağıda verilen 3 özelliği sağlaması gerekir (Percival ve Walden, 2000).

$$1. \int_{-\infty}^{\infty} \psi(u) du = 0 \quad (5.27)$$

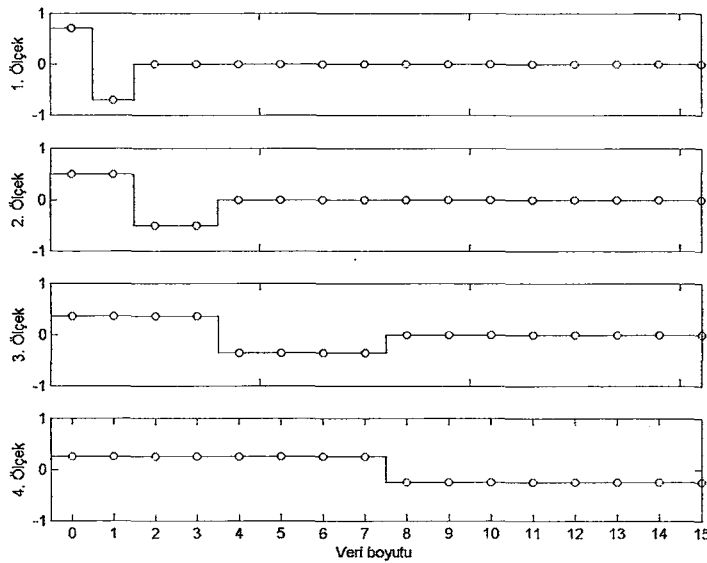
$$2. \int_{-\infty}^{\infty} \psi^2(u) du = 1 \quad (5.28)$$

$$3. \Psi(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(u) e^{-i 2\pi f u} du \quad \text{ise}$$

$$C\psi = \int_0^{\infty} \frac{|\Psi(f)|^2}{f} df \quad \text{ile} \quad 0 < C\psi < \infty \quad (5.29)$$

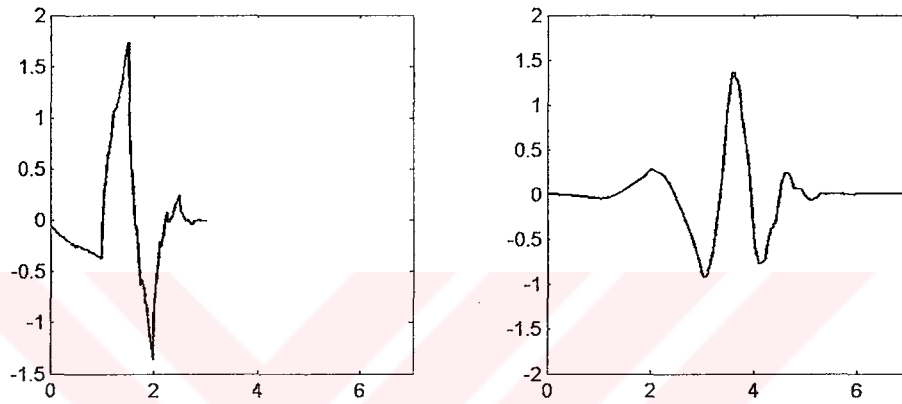
İlk iki özellik ile wavelet dönüşümünün sonlu uzunlukta bir dalgacık olduğu ifade edilir. Verilen wavelet fonksiyonunun u eksen ile sınırlı fonksiyon değeri, yani u eksen ile sınırlandırılmış alanların toplamı sıfırdır (burada alanın negatif değerli olabileceği de düşünülmelidir).

Wavelet fonksiyonu için bir çok tanımlama vermek mümkündür. Bunlar reel değişkenli olabilecekleri gibi kompleks değişkenli de olabilecektir. En basit örnek Haar wavelet olarak verilebilir. Haar fonksiyonu en eski tanımlamalardan biridir (Percival ve Walden, 2000). Şekil 5.7 Haar wavelet'i 2'nin katlarında değişik ölçekler için göstermektedir. Şekilden görüleceği üzere wavelet fonksiyonunun maksimum ve minimum değerlerinden yararlanılarak örneğin 1 ölçeğinde verilen serinin bir t zamanında ardışık iki değerinin ortalaması ya da ortalama değerin belirli bir katsayı ile çarpılmış değeri hesaplanmaktadır. Wavelet fonksiyonunun zaman ekseninde genişliği arttıkça daha çok veri hesaplamaya dahil edileceğinden incelemenin ölçeği de değişmektedir. Verilen bu basit örnekten de görüleceği üzere wavelet fonksiyonu, seri üzerinde (zaman ekseninde) kaydırılarak zamana bağlı değişim ve fonksiyonun genişliği değiştirilerek de değişik ölçeklerde inceleme yapmak mümkün olmaktadır. Bir başka deyişle waveletin genişliği seçilerek optik anlamdaki gibi yakınlaştırma ve uzaklaştırma yani ince ve kaba detayları inceleme olanağı ortaya çıkmaktadır (Louis ve diğ., 1998).



Şekil 5.7 Haar wavelet fonksiyonunun değişik ölçeklerde gösterimi

Haar wavelet örneğinden başka pratikte sıklıkla kullanılan bir başka wavelet fonksiyonu Daubechies waveletidir. Daubechies wavelet ailesine ait db2 ve db4 wavelet fonksiyonları Şekil 5.8’de görülmektedir. db2 özellikle kısa periyotlu bileşenlerin incelenmesinde tercih edilir. Uzun dönemde ortaya çıkan seküler ve periyodik değişimlerle ilgilenildiğinde db4 seçilmesi uygun olacaktır. Şekilden görüleceği gibi db4 wavelet fonksiyonunun db2’ye nazaran zikzaklı olmayan daha sürekli bir gidiş göstermesi, bir sonraki bölümde ele alınacak fonksiyon yaklaşımı ve detay değerlerinin de ani olmayan daha ağır bir değişim göstermesine neden olur.



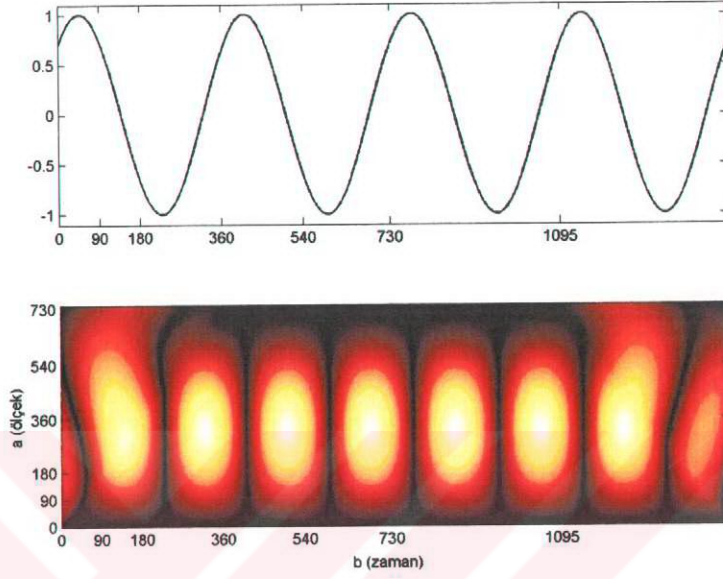
Şekil 5.8 Daubechies db2 ve db4 wavelet fonksiyonları

Çeşitli ölçeklerde inceleme yapmak, fonksiyonun periyot değişimi dolayısıyla da frekans spektrumu hakkında bilgi vereceğinden pratikte waveletin bu iki özelliği birleştirilerek frekans-zaman uzayında çözümden bahsedilir. Şekil 5.9’da yıllık periyoda sahip bir sinüs fonksiyonu zaman serisinin Haar wavelet kullanılarak wavelet dönüşümü görülmektedir. Koyu renkler minimumu açık renkler ise maksimumu göstermektedir. Şekilden serinin zaman ekseninde ve değişik ölçeklerde değişimi görülebilmektedir.

5.2.2 Ayrık (Diskret) Wavelet Dönüşümü

Şekil 5.9’da görüldüğü üzere sürekli wavelet dönüşümü ile bir sinyalin minimum örnekleme zamanı kadar değeri ile sinyalin boyut değeri arasında her ölçekte zamana karşı değişimi görmek mümkündür. Ancak bu hesaplama yükünü artıracaktır. Bir diğer dezavantaj da sürekli wavelet ile analiz, waveletin en önemli özelliklerinden biri olan sinyalin süzgeçlenmesine olanak vermemesidir. Sürekli wavelet analizi

daha çok seküler değişimin olmadığı periyodik değişimlerin incelenmesinde kullanılabilir (Schmidt ve Schuh, 1999; Schmidt, 2001). Bu bakımdan verilen tek boyutlu sinyalin, sinyale genel bakışı zorlaştıran bütün ölçeklerde analizi yerine diyadik (2^n 'nin katları şeklinde) analizi hesaplama yükünü azaltacak ve problemi görsellik boyutundan çıkaracaktır.



Şekil 5.9 Sinüs fonksiyonu zaman serisinin Haar wavelet dönüşümü

(5.26) eşitliği ile verilen Wavelet dönüşümünün pratik olarak nasıl gerçekleştirildiği Haar Wavelet örneğinde gösterilebilir. Verilecek örnek Percival ve Walden (2000)'den alınmıştır ve bu bölümün başlığına uygun olarak ayrık wavelet dönüşümüne göre çıkarım yapmaktadır. Ancak sürekli Wavelet dönüşümünün temeli de buna dayanmakta olup çok basit bir şekilde genelleştirme yapılabilir. $N = 2^J$ boyutunda bir zaman serisi $x(t)$ ele alınsın. Bu serinin ardışık iki terimi arasındaki değişimi zaman ekseninde gözleyebilmek için 2^{J-1} tane wavelet fonksiyonu tanımlanmalıdır. Aynı şekilde serinin ardışık 4 terimi arasındaki değişim için ise 2^{J-2} wavelet fonksiyonu kullanılır. Böylelikle 2^0 'a kadar J adet farklı ölçekte inceleme yapmak mümkün olabilir. Şekil 5.7'de $J = 4$ için Haar wavelet fonksiyonunun satır vektörleri grafik olarak gösterilmiştir. 1 ölçeğinde ilk iki terim sıfırdan farklıdır ve diğer ölçeklerde de geçerli olmak üzere waveletlerin iki özelliğinden biri olan (5.27) şartını sağlar. Şekildeki örnekte 16 adet veriden oluşan bir vektörde 1. ölçekte yalnızca ilk iki terim arasındaki değişim gösterilmiştir. Aynı

ölçek için 3 ve 4, 5 ve 6 vb. şeklinde toplam 8 adet daha değişim değeri bulunabilir. Bu şekilde bulunacak değişimler örnek olarak GPS zaman serileri için günlük çözümlerin değişimini gösterecektir. 2. ölçekte de 4 boyutlu ölçek vektörü ile 4 farklı değişim izlemek mümkündür. Bu şekilde verilen örnek için $2^J - 1$ adet değişim veya detay elde edilir.

Yukarıda verilen örnekten yararlanılarak matrislerle daha kompakt bir gösterim

$$\mathbf{w} = \mathbf{W} \mathbf{x} \quad (5.30)$$

biçimindedir. Burada $\mathbf{w}$, N boyutlu wavelet katsayılar vektörünü, $\mathbf{W}$, N×N boyutlu Wavelet dönüşümünü tanımlayan matrisi ve $\mathbf{x}$ de incelemesi yapılacak N boyutlu $x(t)$ zaman serisini göstermektedir. $\mathbf{W}$ matrisi

$$\mathbf{W}^T \mathbf{W} = \mathbf{I} \quad (5.31)$$

ortonormal olarak seçilir ve bununla da (5.28)'de verilen şart sağlanmış olur. Örnek olarak 1, 2, 3 ve 4 ölçeklerinde Şekil 5.7'de grafik gösterimi yapılan ilgili matrisin satır vektörleri

$$\mathbf{W}_{1,0}^T = [-\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0, \dots, 0]$$

$$\mathbf{W}_{1,7}^T = [0, \dots, 0, -\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}]$$

$$\mathbf{W}_{2,8}^T = [-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0, \dots, 0]$$

$$\mathbf{W}_{3,12}^T = [-\frac{1}{\sqrt{8}}, \dots, -\frac{1}{\sqrt{8}}, \frac{1}{\sqrt{8}}, \dots, -\frac{1}{\sqrt{8}}, 0, \dots, 0]$$

$$\mathbf{W}_{4,14}^T = [-\frac{1}{4}, \dots, -\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \dots, \frac{1}{4}] \quad \mathbf{W}_{15}^T = [\frac{1}{4}, \dots, \frac{1}{4}]$$

biçiminde tanımlanır. Yukarıda verilen wavelet dönüşüm matrisinin satır vektörlerinde ilk indis ölçeği göstermektedir. Tanımlanan satır vektörlerinin (5.27)

ve (5.28) eşitliklerinde verilen özellikleri sağladığı görülebilir. Gerçekten vektördeki elemanlar toplamı 0 olup her elemanın tek tek kareleri toplamı da 1'dir. $\mathbf{W}_{15}$ ile verilen, wavelet katsayısını değil serinin bütün elemanlarının bir katsayı ile çarpılmış şeklidir. Bu katsayı burada verilen Haar wavelet örneğinde $1/\sqrt{2^J}$ 'dir.

Yukarıda verilen satır vektörleriyle tanımlanan wavelet matrisi ile zaman serisinin (5.30) eşitliğindeki çarpım yapılacak olursa 4 ölçek seviyesi için aranan katsayılar

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} w_0 \\ \vdots \\ w_7 \\ w_8 \\ \vdots \\ w_{11} \\ w_{12} \\ w_{13} \\ w_{14} \\ w_{15} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}(x_1 - x_0) \\ \vdots \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(x_{15} - x_{14}) \\ \frac{1}{2}(x_3 + x_2 - x_1 - x_0) \\ \vdots \\ \frac{1}{2}(x_{15} + x_{14} - x_{13} - x_{12}) \\ \frac{1}{\sqrt{8}}(x_7 + \dots x_4 - x_3 - x_0) \\ \frac{1}{\sqrt{8}}(x_{15} + \dots x_{12} - x_{11} - x_8) \\ \frac{1}{4}(x_{15} + \dots + x_8 - x_7 - \dots x_0) \\ \frac{1}{4}(x_{15} + \dots + x_0) \end{bmatrix}$$

ile bulunabilir. Çeşitli ölçeklerde ayrışımı yapılan $\mathbf{x}$ serisi elde edilen wavelet katsayılarından tekrar elde etmek istenirse

$$\mathbf{x} = \mathbf{W}^T \mathbf{w} \quad (5.32)$$

şeklinde bulunur. Burada wavelet dönüşüm matrisinin (5.31)'de verilen özelliğinden yararlanılır. Farklı ölçeklerdeki incelemenin matematiksel ifadesinin yapılması amacıyla (5.32) eşitliği tekrar yazılırsa

$$\mathbf{x} = \sum_{j=1}^J \mathbf{W}_j^T \mathbf{w}_j + \mathbf{V}_j^T \mathbf{v}_j = \sum_{j=1}^J D_j + S_j \quad (5.33)$$

olur. (5.33) eşitliğinin sağ tarafında ilk terim verilen örnekten de görüleceği gibi $i=1, \dots, J$ arasında değişik ölçeklerdeki detayların toplamını, ikinci terim ise serinin bütün elemanlarının toplamının bir katsayı ile çarpılmış durumudur. Elde edilen bu farklı ölçeklerdeki detaylar kullanılarak yine farklı ölçeklerde serinin daha düz gidişi gözlenebilir. Serinin 0. ölçekte değeri detay ve ortalama değer fonksiyonu ile

$$\mathbf{x} = S_0 = \sum_{k=1}^J D_k + S_J \quad (5.34)$$

olup serinin kendisidir. 1. ölçekte serinin yaklaşık değeri aynı ölçekteki detayların işleme katılmamasıyla

$$S_1 = \sum_{k=2}^J D_k + S_J = D_2 + \dots + D_J + S_J \quad (5.35)$$

biçimindedir ve aynı şekilde devamla

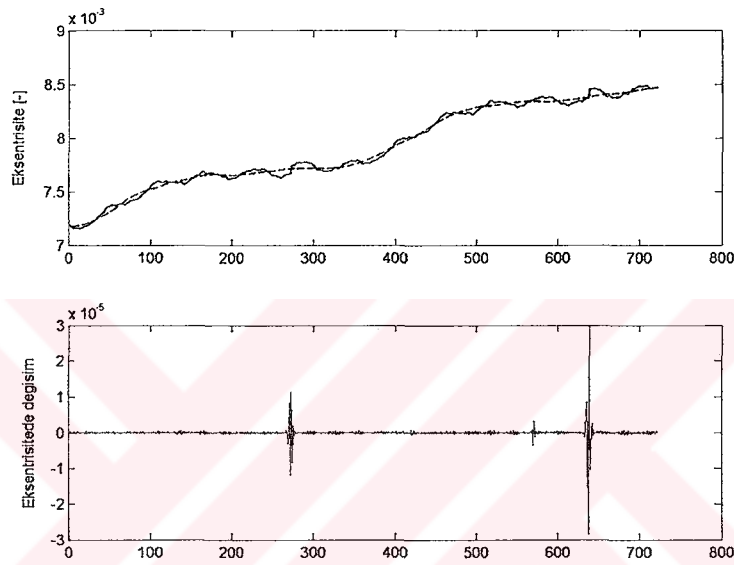
$$S_{J-1} = D_J + S_J \quad (5.36)$$

olur. Genel olarak j . ölçekte inceleme için serinin yaklaşımı

$$S_j = \sum_{k=j+1}^J D_k + S_J \quad (5.37)$$

ile verilir. Görüleceği üzere ölçek değeri arttıkça serinin daha geniş aralıklarda incelemesi yapılmakta dolayısıyla seriye daha genel olarak bakma olanağı ortaya çıkmaktadır. Waveletin yukarıda verilen örnekte olduğu gibi kullanılması ani değişimleri ortaya çıkarması yanında bir başka önemli özelliğini de ortaya çıkarmaktadır ki o da sinyalleri süzgeçleyebilmesidir. Wavelet dönüşümü ile elde edilecek detaylar kullanılarak seçilecek ölçeğe bağlı olmak üzere serinin gidişi gözlenebilir. Fourier dönüşümü ile fonksiyonun daha genel, büyük periyotlardaki değişimi süzgeçleme ile görülebilir.

Şekil 5.10 daha önce Bölüm 5.2’de büyük yarı ekseninin zamanla değişimi verilen PRN25 numaralı GPS uydusunun eksentrisitesini göstermektedir. Uydunun eksentrisite değerinin 6. ölçekte kesikli çizgi ile gösterilen süzgeçlenmiş seküler değişimi db4 wavelet ile bulunmuştur. Aynı şekilde ve altta eksentrisite zaman serisinin iki noktada ani değişiminin 1. ölçekteki detay değeri görülmektedir. Sistemin güvenliğini sağlamak amacı ile uyduya yapılan müdahale, eksentrisite zaman serisinde belirli belirsiz seçilirken wavelet dönüşümü ile açık bir şekilde ortaya konmaktadır.

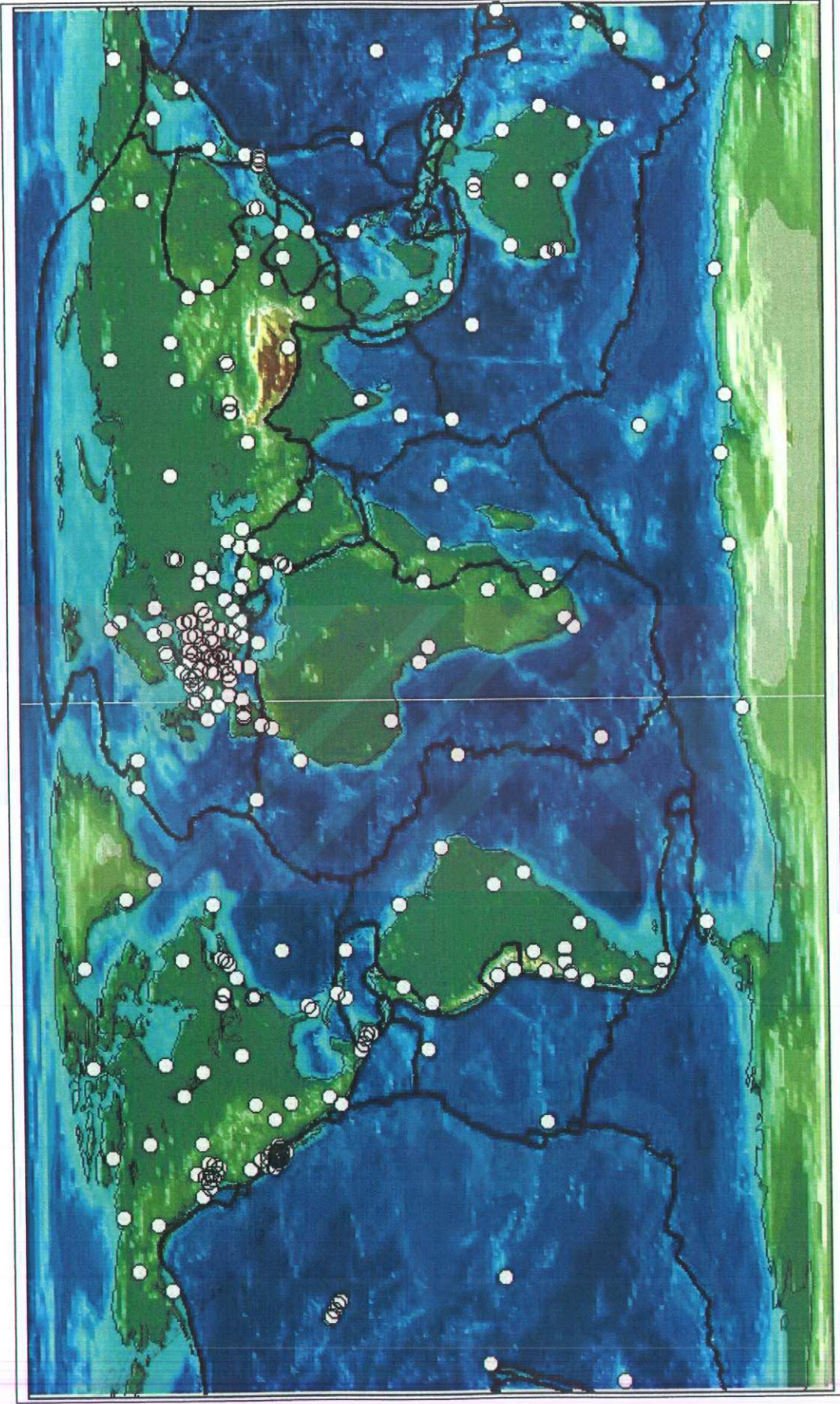


Şekil 5.10 PRN25 uydusunun eksentrisite zaman serisi ve 1. ölçekte detayı

6. GPS ZAMAN SERİLERİNİN ANALİZ UYGULAMALARI

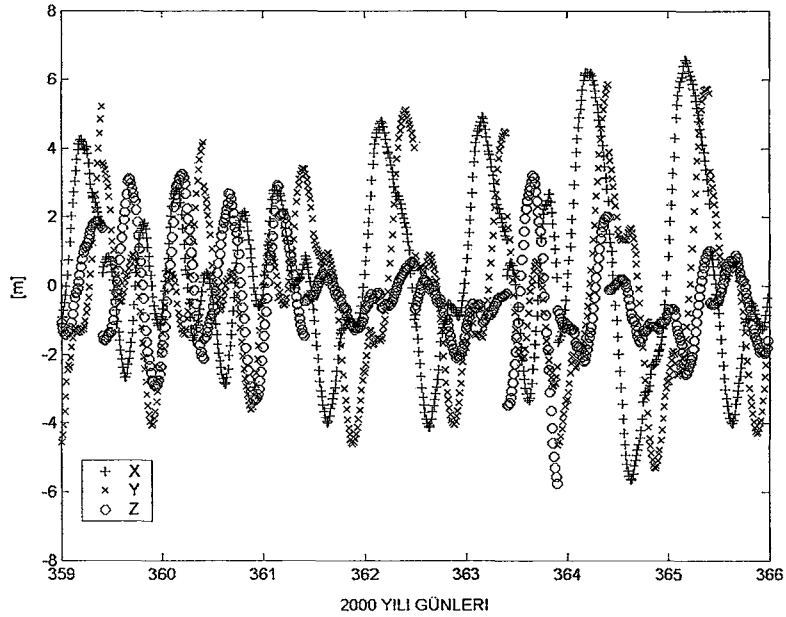
6.1 Uygulama Ağı ve Gözlemleri

Tezde kullanılan verilerin kaynağı uluslararası bir kuruluş olan International GPS Service (IGS)'dir. IGS (<http://igsb.jpl.nasa.gov>), 1994 yılından beri aktif olan ve dünyanın bir çok ülkesinden araştırma merkezi ve üniversitelerin katılımıyla oluşturulmuş bir kuruluştur. Kuruluş ilk başta yer bilimlerinin yüksek presizyon ihtiyacını karşılamak amacıyla International Geodynamics Service ismiyle faaliyete geçmiştir (Kılıçoğlu, 1999). Ancak daha sonra GPS'in daha operasyonel hale gelmesi, dünyada kullanımının yaygınlaşması, yer bilimlerinin ilgili dalları olan jeodezi, jeofizik, jeodinamik, jeoloji gibi disiplinler için GPS'in işletilmesi çok kolay bir sistem olması nedenleriyle ismi bugünkü halini almıştır. Kuruluş bugün yalnızca GPS ile yetinmeyerek çatısı altında GPS'in bir benzeri sayılabilecek, Rus GLONASS sistemi için de ayrı bir çalışma grubu kurmuştur. IGS, sabit istasyonlar, veri merkezleri, analiz merkezleri ve koordinasyon merkezi birimlerinden oluşur (IGS, 2001; Kılıçoğlu, 1999). Sabit istasyonlar yeryüzüne dağılmış Şekil 6.1'de görülen yaklaşık 360'a yakın noktadan oluşmaktadır. Sabit istasyonlarda, kadastral ölçmeler ve imar uygulamaları gibi cm presizyonlu amaçlar için kullanılan GPS antenlerinden farklı olarak çok yolluluktan az etkilenen, iç içe halkalı ve çoğunlukla radom denilen plastikten koruyucu bir başlık taşıyan antenler kullanılmaktadır. İstasyonlarda 24 saat boyunca veri kaydedilmesi söz konusu olduğundan kesintisiz bir güç kaynağının mevcut olması da gerekmektedir. Sabit istasyonlarda 30 s örnekleme aralığında, kullanılan alıcıya ve modeline bağlı olarak her iki kanalda taşıyıcı faz ve kod ölçüleri ile Doppler gözlemleri yapılmaktadır. Söz konusu veriler aslında her saniye için toplanmakta, ancak 30 saniyelik ortalamalar depolanmaktadır. Seçilen 30 s örnekleme aralığı, IGS için bir standart olarak kabul edilmiştir. Bazı istasyonlarda atmosfere ilişkin ölçmeler yapılmakta ve bunlar da kaydedilen veriler arasında bulunmaktadır. Toplanan 24 saatlik veriler, o günün sonunda veri merkezlerine iletilmekte ve kullanıcıların hizmetine sunulmak üzere arşivlenmektedir.



Şekil 6.1 IGS sabit istasyonlarının yeryüzüne dağılımı

IGS'in GPS gözlem verilerinin arşivlenmesinden başka bir diğer önemli hizmeti, bölgesel ve küresel ölçekte çalışmalar için gereksinim duyulan GPS hassas yörünge bilgisini üretmesidir. Bu yörünge bilgileri, IGS ağından seçilen uygun geometrideki noktalarda toplanan GPS verileriyle elde edilerek yer merkezli bir koordinat sisteminde kullanıcılara sunulur. 7 ayrı analiz merkezi tarafından farklı program ve ağ konfigürasyonu kullanılarak hesaplanan yörünge verileri, analiz merkezlerinin kullandığı ortak GPS sabit istasyonları aracılığıyla IGS koordinasyon merkezince birleştirilerek uyduların zamana referanslı sonuç koordinatları bulunur. Hassas yörünge verisi, istasyonlar arasında baz uzunluklarının 100 km'yi aştığı yüksek presizyon amaçlanan çalışmalarda kullanılması gerekir. Zira GPS'in kendi yörünge verisi olan yayın efemerisi ile orta ve uzun bazlı ağların değerlendirilmesi, amaçlanan mm ve mm altı doğruluğu sağlayamayacaktır. GPS yayın efemerisinde uydu konumları Kepler elemanları ve bunların zamana bağlı değişimleri cinsinden verilmektedir. Bu veriler uydunun geçmiş hareketlerinden ileriki zamanlar için kestirilir ve her 2 saatte bir güncellenir. Hassas yörünge verileri yine IGS tarafından kabul edilen ve uyduların 15 dakika aralıkla koordinatlarını veren SP3 standart formatındadır. Şekil 6.2, GPS navigasyon verisi ve IGS'in hassas yörünge verisi ile hesaplanan PRN25 uydusuna ait yermerkezli sistemde koordinat bileşenlerinin farkını 2000 yılının bir haftalık kesimi için göstermektedir. GPS yayın efemerisinin bu farklarla hesaplanan doğruluğu her bir bileşen için yaklaşık ± 3 m bulunmuştur.

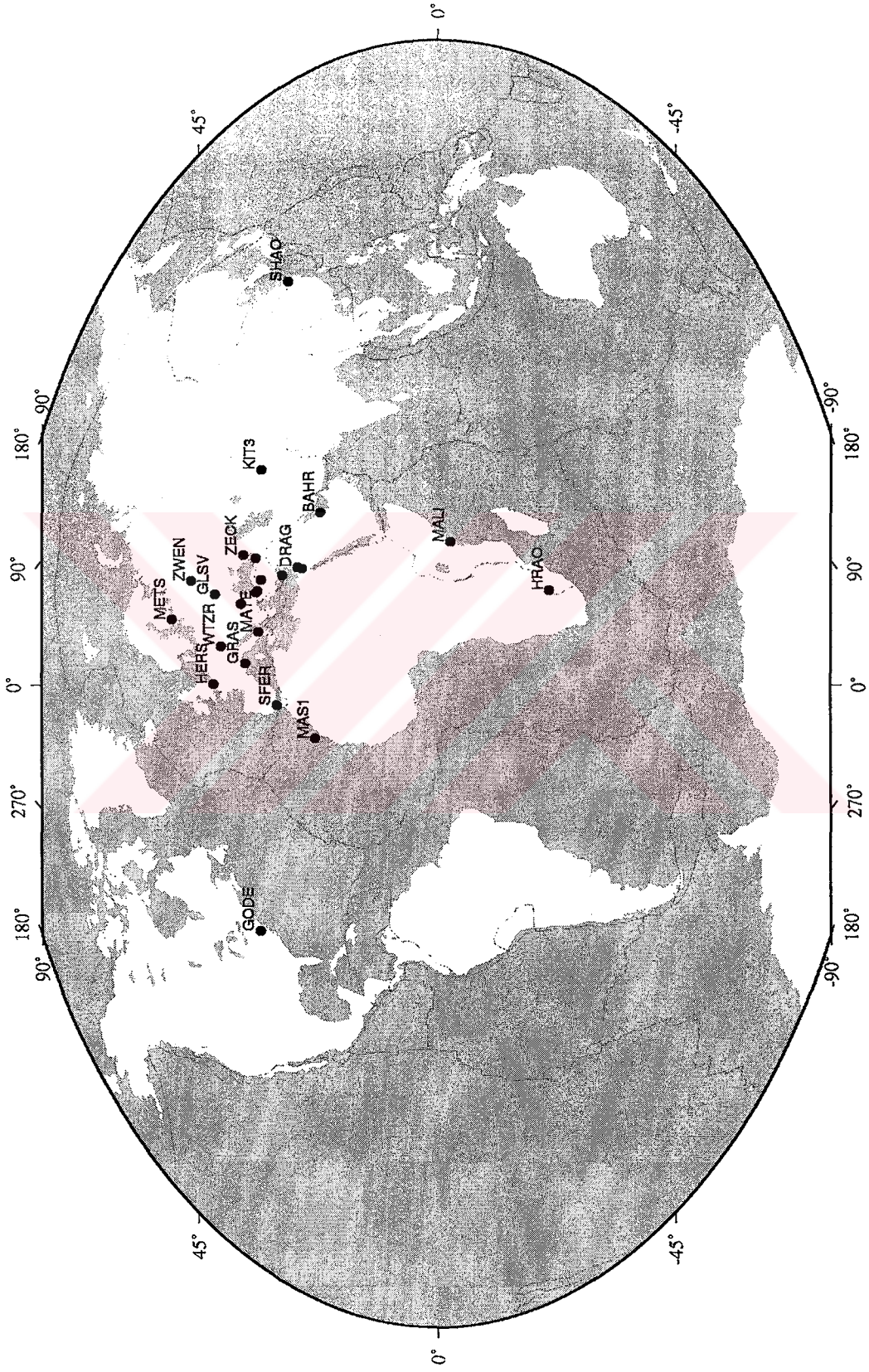


Şekil 6.2 GPS ve hassas yörünge verilerinin karşılaştırılması

IGS tarafından kullanıcılara sunulan, sabit istasyonlarda toplanan faz ve kod gözlemleri ile kullanıcıların uzun bazlı bölgesel ve küresel ölçeklerdeki çalışmalarına yardımcı olmak ve Türkiye'nin tektoniği hakkında bilgi üretmek ve uzun GPS bazlarında analiz yöntemleri geliştirmek ve sınamak amacıyla, Türkiye'deki sabit istasyonları çevreleyen, IGS noktalarından oluşan 24 noktalı bir ağ tasarlanmıştır. Şekil 6.3'de gösterilen ağın en kısa baz uzunluğu ISTA-TUBI, 50 km, en uzun kenarı GODE-HRAO, 10850 km'dir.

Noktaların isimleri, bulundukları yerler ile işletilmeye başladıkları tarihler Tablo 6.1'de verilmektedir. Ağ, Anadolu tektonik bloğu ile onun yakın ve uzak çevresindeki iç ve dış çerçeveden oluşmaktadır. Anadolu bloğundaki ANKR noktası ile ona yakın ancak Avrasya tektonik levhasında yer alan ISTA, TRAB ve TUBI istasyonları Türkiye sınırları içindedir. Diyarbakır'daki DYR2 ile Ermenistanın başkenti Erivan'daki NSSP istasyonları, inceleme alanına çok yakın olmalarına rağmen değerlendirmenin yapıldığı Ocak 2000-Aralık 2002 tarihleri arasında çok sayıda gün için veri eksikliği olduğundan değerlendirmeye dahil edilememiştir.

Uygulama ağını oluşturan istasyonların 3 yılı kapsayan 1096 güne ait GPS gözlem verilerine IGS'in veri merkezlerinden ikisi olan Almanya'daki Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG, <http://www.ifag.de>) ve ABD'deki Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC, <http://sopac.ucsd.edu>) adlı kuruluşların ftp sunucularından ulaşılmıştır. 24 istasyona ait günlük HATANAKA RINEX (Receiver Independent Exchange) gözlem verisi boyutu yıllara göre Tablo 6.2'de verilmiştir. Bir istasyona ait bir günlük HATANAKA formatında sıkıştırılmış dosya boyutu, o istasyonda kaydedilen gözlem türüne bağlı olarak 200 KB ile 400 KB arasında değişmekte, ortalamada ise 280 KB'lık bir değer elde edilmektedir. HATANAKA formatı, IGS tarafından standart olarak kabul edilen ve yine IGS tarafından kabul gören alıcıdan bağımsız değişim formatı RINEX gözlem dosyası boyutlarını küçültmeyi sağlayan bir algoritma kullanır. Bu algoritma, bir RINEX dosyasında gözlemlerin ardışık olması nedeniyle tekrarlanan sayıların epoklar arasında çoklu farklarını teşkil ederek dosya boyutunu %70 oranında küçültür. Örnek olarak 1.8 MB'lık bir dosyanın boyutu bu format uygulanır ve ertesinde sıkıştırılırsa %90 oranında azalarak 0.2 MB'a iner (Hatanaka, 1996). Gözlem dosyalarına ek olarak



Şekil 6.3 IGS sabit istasyonlarından seçilerek oluşturulan uygulama ağı (uyga ağı)

SP3 formatında günlük hassas yörünge bilgileri IGS merkezi büronun ftp sunucusundan sağlanmıştır.

Tablo 6.1 Uygulamada kullanılan ağ için seçilen istasyonlara ait bilgiler

İSTASYON	ENLEM	BOYLAM	İSMİ, ÜLKE	KURULUŞ TARİHİ
ANKR	39° 42' N	32° 46' E	Ankara, Türkiye	Haziran 1995
BAHR	26° 03' N	50° 36' E	Bahreyn, Bahreyn	Mart 1995
BUKU	44° 16' N	26° 08' E	Bükreş, Romanya	Şubat 1999
DRAG	31° 25' N	35° 24' E	Metzoki Dragot, İsrail	Şubat 2000
GLSV	50° 11' N	30° 30' E	Golosiiv, Ukrayna	Aralık 1997
GODE	38° 50' N	76° 50' W	Greenbelt, USA	Nisan 1993
GRAS	43° 24' N	06° 55' E	Observatoire de Calern, Fransa	Şubat 1995
HERS	50° 41' N	00° 20' E	Herstmonceux, İngiltere	Mart 1992
HRAO	25° 44' S	27° 41' E	Hartebeesthoek, G. Afrika	Eylül 1996
ISTA	40° 55' N	29° 01' E	İstanbul, Türkiye	Aralık 1999
KIT3	38° 57' N	66° 53' E	Kitab, Özbekistan	Ekim 1994
MALI	02° 59' S	40° 11' E	Malindi, Kenya	Kasım 1995
MASI	27° 36' N	15° 38' W	Mas Palomas, İspanya	Nisan 1996
MATE	40° 28' N	16° 42' E	Matera, İtalya	Ocak 1991
METS	60° 03' N	24° 24' E	Metsahovi, Finlandiya	Nisan 1992
NICO	34° 58' N	33° 24' E	Lefkoşa, G. Kıbrıs	Mayıs 1997
RAMO	30° 26' N	34° 28' E	Mitzpe Ramon, İsrail	Haziran 1998
SFER	36° 17' N	06° 12' W	San Fernando, İspanya	Aralık 1995
SHAO	30° 56' N	121° 12' E	Şangay, Çin	Ocak 1995
TRAB	40° 48' N	39° 47' E	Trabzon, Türkiye	Aralık 1999
TUBI	40° 36' N	29° 27' E	Gebze, Türkiye	Mayıs 1998
WTZR	48° 57' N	12° 53' E	Wettzell, Almanya	Şubat 1995
ZECK	43° 36' N	41° 34' E	Zelenchukskaya, Rusya Fed.	Temmuz 1997
ZWEN	55° 31' N	36° 46' E	Zwenigorod, Rusya Fed.	Mart 1995

Tablo 6.2 Uygulama ağının veri boyutu

Yıl	Boyut (MB)	Dosya Sayısı	Veri alınabilen günlük ortalama istasyon sayısı
2000	2174	8138	22
2001	2289	8098	22
2002	2358	8178	22
Σ	6821	24414	22

6.2 GPS Zaman Serilerinin Elde Edilmesi

6.2.1 Uygulama Ağının Hesabı

GPS zaman serileri kavramı ile, önceden belirlenen bir örnekleme aralığında analiz edilen GPS gözlemlerinden elde edilen sonuçların zamana bağlı değişimi ifade edilmek istenmektedir.

Bu çalışmada IGS'in Şekil 6.1'de yerleri gösterilen sürekli kayıt istasyonlarından seçilerek oluşturulan test ağı noktalarının, günlük sinyal kayıtlarından tez kapsamında hesaplanmış koordinatları, zaman serilerinin elemanlarını oluşturmaktadır. Sabit istasyonlarda 30 s örnekleme aralığı ile 24 saat boyunca kaydedilen tüm gözlemler değerlendirmede kullanılmıştır. 15°'den küçük eğim açılı sinyaller değerlendirmede kullanılmamıştır. Çalışmada kuzey-güney (NS) ve doğu-batı (EW) yönlerindeki (yatay) koordinat bileşenleri incelenmiş, yükseklik bileşeni araştırma konusu dışında tutulmuştur.

24 noktadan oluşan 3 boyutlu GPS ağının, inceleme zaman diliminde yer alan bir güne ilişkin koordinatları MIT (Massachusetts Institute of Technology) tarafından geliştirilen GAMIT (GPS At MIT) yazılımı kullanılarak serbest dengeleme ile bulunmuştur (King ve Bock, 1999). GAMIT, serbest ağ çözümü olarak datum parametrelerinden dönüklük ve ölçeği göz ardı eden dinamik ağ çözümü yaklaşımını benimsemiştir. Buna göre Gauss-Markoff modelinin fonksiyonel ve stokastik modeli

$$\begin{pmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{v}_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{I} \end{pmatrix} \mathbf{x} \quad (6.1a)$$

$$\Sigma = \sigma_0^2 \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_{\parallel} & \\ & \mathbf{Q}_{x_0 x_0} \end{pmatrix} \quad (6.1b)$$

olarak verilmektedir. Buradan çözüm vektörü

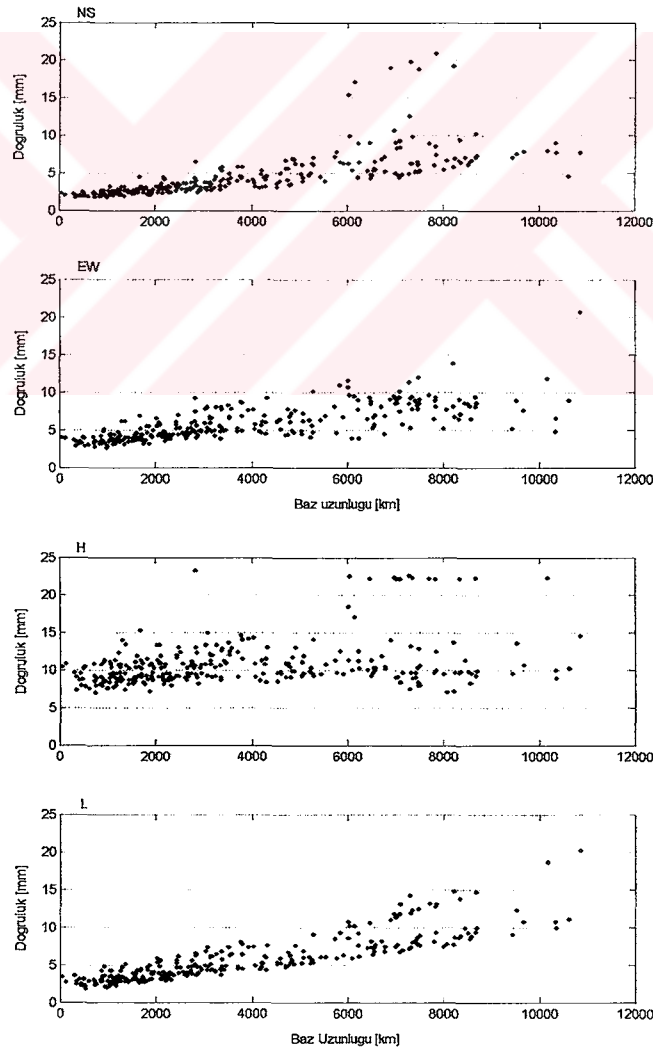
$$\mathbf{x} = \left(\mathbf{A}^T \mathbf{P}_{\parallel} \mathbf{A} + \mathbf{P}_{x_0 x_0} \right)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P}_{\parallel} \mathbf{l} \quad (6.2)$$

eşitliği ile hesaplanır. $\mathbf{P}_{x_0 x_0}$ yaklaşık koordinatların ağırlık matrisi genelde köşegen bir matris olarak seçilir.

Çözümde bilinmeyen olarak alınan parametreler; istasyonların yer merkezli bir sistemde koordinatları, uyduların 4. Bölümde bahsedilen Kepler elemanları ve 9 adet güneş radyasyon basıncı parametresi, kutup hareketi parametreleri ve bunların zamana göre birinci dereceden türevi gibi büyüklükleridir. Bunlara ek olarak her istasyonda zenit yönünde troposferik gecikmenin birer saat aralıkla kestirilen değerleri ile 2000 km'ye kadar baz uzunlukları için 3.Bölüm'de ele alınan "Wide ve Narrow Lane" tamsayı belirsizlik değerleri fonksiyonel modele dahil edilmiştir.

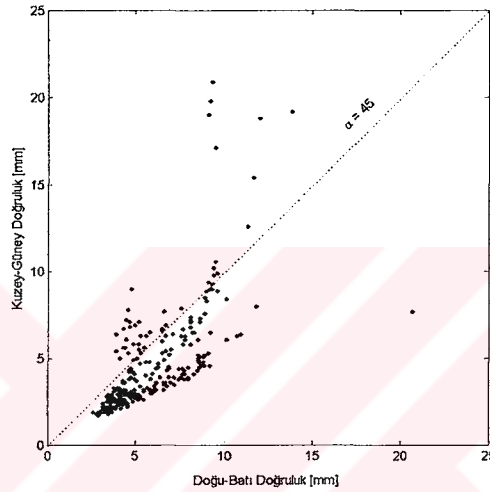
6.2.2 Kısa Dönemli (Günlük) Doğruluklar

GPS ölçülerinin gerçekçi bir doğruluk analizi için günlük baz çözümlerinin doğrulukları incelenmelidir. Bunun için uygulama ağında 2000 yılının 359. gününe ait 300 adet baz çözümünde NS, EW, H yükseklik bileşeni ve baz uzunluğu L'nin doğrulukları elde edilmiştir. Şekil 6.4'de verilen örnekte bileşenlerin doğruluklarının



Şekil 6.4 Baz çözümü iç doğrulukları

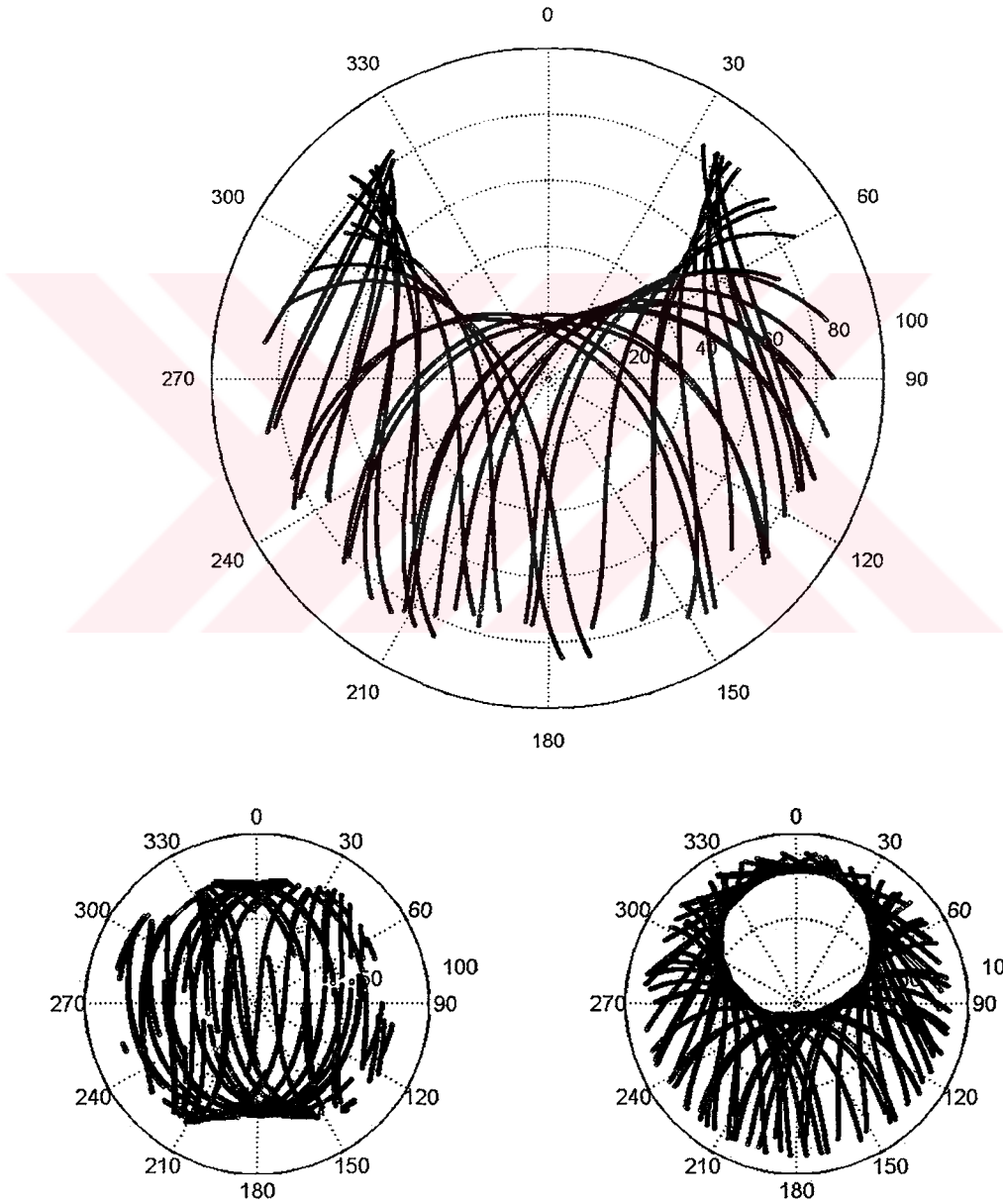
baz uzunluğuna bağlılığı açıkça görülmektedir. Bu bağımlılık **Larson ve Agnew (1991)** tarafından lineer regresyonla hesaplanarak pratik için $\pm[(2-4) \text{ mm} + (0.6-0.8) \text{ ppb}]$ bağıntısı elde edilmiştir. NS ve EW bileşenlerinde olduğu gibi baz uzunluğu ile değişen anlamlı lineer bir trend yükseklik bileşeni için gözlenememektedir. Burada istasyonların yükseklik bileşenlerine ait doğrulukların baz uzunluğuna çok güçlü bir bağlılığı söz konusu olmayıp $\pm 7-15 \text{ mm}$ arasında değiştiği görülmektedir. Baz uzunluğu ile doğruluğu arasında yine doğrusal bir ilişki mevcuttur. Şekil 6.5’de NS ve EW bileşenlerine ait doğrulukların grafik olarak karşılaştırılması sunulmaktadır. Her iki eksenin aynı ölçekte çizildiği şekil, $\alpha = 45^\circ$



Şekil 6.5 NS ve EW bileşenleri doğruluklarının karşılaştırılması

doğrusuyla iki kısma ayrılırsa noktaların ağırlık merkezinin bu doğrunun alt kısmında kalacağı görülmektedir. Buradan NS bileşeninin, EW bileşenine nazaran 1.5 ile 2 kat daha iyi kestirildiği şeklinde bir çıkarım yapılabilir. Bunun nedeni; Şekil 6.6’de üç farklı enlemdeki istasyonda uyduların gökyüzünde dağılımını gösteren azimutal projeksiyonda da yansımaları bulan, GPS uydularının yörünge düzlemlerinin ekvator düzlemiyle yaptığı 55° ’lik açıdır. Zira bu nedenle uyduların gökyüzünde 24 saatlik dağılımları homojen olmayıp örnek olarak orta enlemdeki ISTA istasyonunda NS yönünde U biçiminde gözlem alınamayan bir boşluk oluşmaktadır. 60° kuzey enlemindeki METS istasyonunda kuzey yönünde daire şeklinde bir boşluk gözlenmektedir. Kutuptaki bir noktanın azimut-yükseklik diyagramının ortasında bir boşluk olacağı METS’e ait şekilden çıkarılabilir. Ekvator bölgesine yakın MALI’de METS’deki gibi bir boşluk söz konusu değildir. Her üç şekildeki ortak özellik uydu hareketinin çoğunluğunun NS doğrultusuna hemen hemen paralel seyretmesidir. Ayrıca yörünge eğiminin 55° ile NS bileşenine açılal

olarak daha yakın olması bu bileşen yönündeki doğruluğun daha iyi kestirilmesi ile sonuçlanmaktadır. Gerçekten sınır durumu olarak yörünge eğiminin 90° olduğu bir uydu için EW bileşenine duyarsızlık maksimum olacaktır. Yine yükseklik bileşeninin diğer iki bileşene nazaran daha kötü doğruluklarla kestirilmeleri, bu açıklamayla benzerlik göstermektedir. Keza minimum uydu yükseklik açısı 15° seçilmesiyle yalnızca başucu yönünde ve bir koninin tabanında $150''$ lik bir alan içinde kalan uydular gözlenebilmektedirler.



Şekil 6.6 ISTA (üstte), MALI (alt-solda) ve METS istasyonlarında 2002 yılı 250. günde görülebilen tüm uyduların azimut-yükseklik değişimi

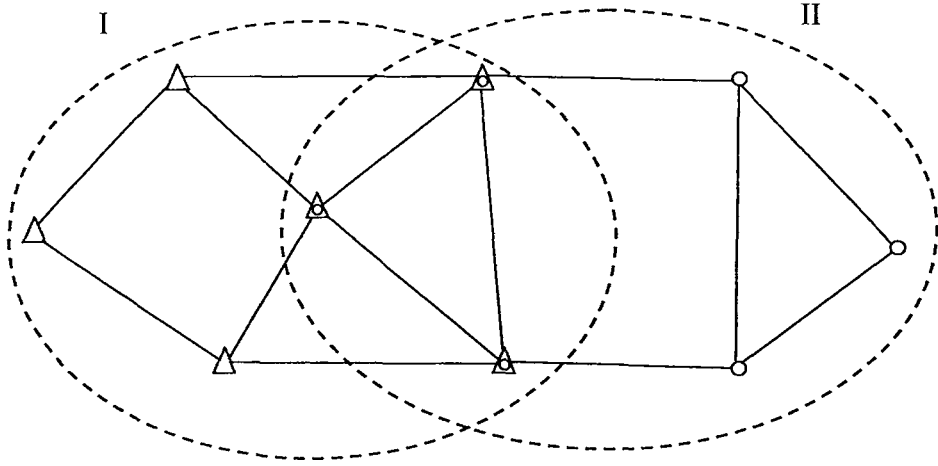
Günlük GPS gözlemlerinin değerlendirilmesi sonucunda bulunan düzeltmelerle hesaplanan doğruluk, öncül standart sapmaya kıyasla yaklaşık 5 ile 6 kat daha optimistik olarak elde edilmektedir (Illner ve Jäger, 1993). Bu ardışık faz gözlemlerinin birbirleriyle yüksek korelasyonlu olmasından kaynaklanmaktadır ve yalnızca iç doğruluğu ifade eder (King, 2002). Bu nedenle doğruluk verileri, öncül standart sapmanın soncul standart sapmaya oranı ile çarpılarak ölçeklendirilmelidir. Ancak bu şekilde uzun dönemde elde edilen doğruluklarla gerçekçi karşılaştırma beklenmelidir.

6.2.3 Farklı Serbest Ağ Çözümlerinin Birleştirilmesi ve Datum Belirleme

Uygulama ağının verileri 1096 gün için ayrı ayrı değerlendirilerek birbirinden bağımsız günlük çözümler üretilmiştir. Çözümler sonucunda nokta koordinatları, uydu ve kutup hareketi parametreleri ve bunların varyans-kovaryans matrisleri elde edilmiştir. Bulunan günlük sonuçlar, GAMIT formatı olan h-dosyalarında ASCII kodda kaydedilmiştir. h-dosyalarında parametre kestirimi ile bulunan bilinmeyenler ve bunların varyans-kovaryans matrisine ek olarak bu bilinmeyenlerin yaklaşık değerleri ve bunların (6.1b)'de gösterildiği gibi bulunan varyans-kovaryans matrisleri de kaydedilir. Elde edilen günlük çözümlerin, birlikte değerlendirmelere konu edilebilmesi için ortak bir datumda birleştirilmesi gerekmektedir. Ortak datum için örnek San Diego Kaliforniya Üniversitesi'ne bağlı SOPAC tarafından üretilen h-dosyaları olabileceği gibi standart format olan SINEX (Software Independent Exchange) yapısında elde edilmiş diğer çözümler de olabilir. İki tür farklı çözüm vardır. Aynı ağa ait farklı günlerin sinyal değerlendirmesinden ileri gelen farklı çözümler olabildiği gibi, aynı günün sinyalleri farklı ağ yapısında değerlendirilerek, aynı noktalar için farklı koordinatlar da hesaplanabilir. Aynı güne ait farklı çözümlerin birleştirilmesi, iki ağ örneğinde gösterilebilir. İki ağ için Gauss-Markoff Modeli

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1' - \mathbf{X}_1' \\ \mathbf{X}_2' - \mathbf{X}_2' \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1' \\ \mathbf{v}_2' \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix} \quad \Sigma' = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_I = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1' & \mathbf{Q}_{12}' & \mathbf{0} \\ \mathbf{Q}_{12}' & \mathbf{Q}_2' & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{X}_1'' - \mathbf{X}_1' \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{X}_N'' - \mathbf{X}_N'' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1'' \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{v}_N'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix} \quad \Sigma'' = \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{II} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_1'' & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_{1N}'' \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{Q}_{1N}'' & \mathbf{0} & \mathbf{Q}_2'' \end{bmatrix} \quad (6.4)$$



Şekil 6.7 Farklı çözümlerin birleştirilmesi grafik gösterimi

biçiminde yazılabilir. I ve II üst indisleri birinci ve ikinci ağı, $\mathbf{x}_1$ her iki ağda olan ortak noktaların koordinat bilinmeyen vektörünü, $\mathbf{x}_2$ I. ağda olan fakat II. ağda olmayan noktaları, $\mathbf{x}_N$ ise II. ağdaki ortak olmayan noktaların koordinat bilinmeyenleri vektörleridir (Şekil 6.7). I. ve II. ağ için yukarıda verilen eşitlikler düzenlenir

$$\begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I}_{II} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_I \\ \mathbf{v}_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_I \\ \mathbf{A}_{II} \end{bmatrix} \mathbf{x}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

ve en küçük kareler yöntemi uygulanırsa

$$\mathbf{F} = \mathbf{Q}_I \mathbf{A}_{II}^T (\mathbf{Q}_{II} + \mathbf{A}_{II} \mathbf{Q}_I \mathbf{A}_{II}^T)^{-1} \quad (6.6)$$

yardımcı büyüklüğü ile

$$\mathbf{x} = \mathbf{0} + \mathbf{F} (\mathbf{I}_{II} - \mathbf{A}_{II} \mathbf{0}) = \mathbf{F} \mathbf{I}_{II} \quad (6.7)$$

$$\mathbf{Q}_{xx} = \mathbf{Q}_I - \mathbf{F} \mathbf{A}_{II} \mathbf{Q}_I \quad (6.8)$$

bilinmeyenler ve bunların varyans-kovaryans matrisi bulunabilir. (6.7) ve (6.8) eşitlikleri Kalman Süzgeçleme eşitlikleri olarak da bilinen eşitliklerdir. (Koch, 1987; Herring ve diğ., 1990; Dong ve diğ., 1998). Eşitliklerden görüleceği üzere I. ağdaki sıfır vektörü ve bunun kofaktörler matrisi yardımıyla II. ağın yeni noktalarının

koordinatlarının I datumundaki koordinatları bulunabilmektedir. Farklı ağlara ait çözümlerin birleştirilmesi her iki ağdaki ortak noktalar kullanılarak bunların yaklaşık değerleri ile ortak bir datuma S-dönüşümü ile de gerçekleştirilebilir (**Demirel, 1992**).

İncelemeye konu olan 24 noktalı ağın datumunun, analiz sonuçlarına etkisini, olabildiğince ortadan kaldırabilmek için, datumun daha üst çerçeve noktalardan belirlenmesi yoluna gidilmiştir. Şekil 6.3'deki nokta kümesi, SOPAC tarafından değerlendirilmesi yapılan 4 farklı ağ ile yukarıda açıklandığı gibi yine MIT tarafından geliştirilen GLOBK programı kullanılarak birleştirilmiş ve küresel ölçekte ve tasarlanan ağa nazaran daha homojen dağılımda 190'ın üzerinde noktaya sahip bir ağ elde edilmiştir. Elde edilen ağa ait noktaların koordinatları ile bunların varyans-kovaryans matrisi ortak bir referans sistemindedir. Bu 4 farklı ağın her biri, istasyonlarda alıcılarda kaydedilen günlük verilere bağlı olarak 30 ile 50 arasında nokta içermekte olup sırasıyla igs1, igs2, igs3 ve eura olarak isimlendirilmektedir. Ağları oluşturan noktaların yeryüzüne dağılımı ekte Şekil A.1, A.2, A.3 ve A.4'de görülmektedir. SOPAC tarafından çözümü yapılan bu ağların yukarıda açıklandığı gibi birbirleriyle ilişkisinin kurulabilmesi için her çözümde ortak en az 3 noktanın bulunması şartı, dikkate alınmıştır.

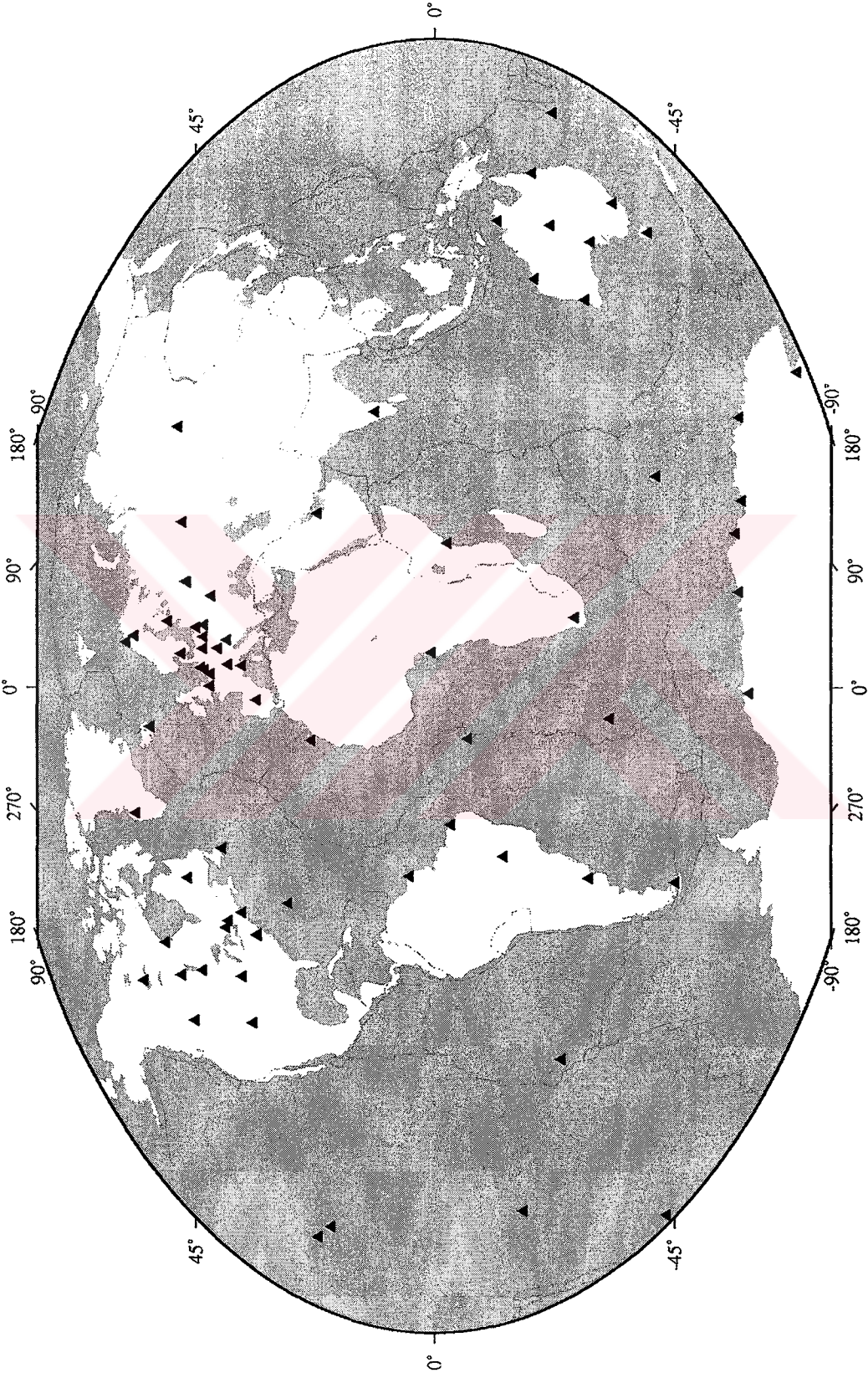
Birleştirme sonucunda 190'ın üzerinde sabit istasyonun koordinat değerleri, her bir GPS uydusuna ait Kepler elemanları ve güneş radyasyon parametreleri ile kutup hareketi parametreleri her gün için ayrı ayrı elde edilmiştir. Yukarıda verilen parametrelere ait varyans-kovaryans matrisi de birleştirme sonucu (6.8) eşitliği ile bulunmuştur. SOPAC çözümüne ait datuma sahip olan bu sonuçların ITRF97 datumuna dönüştürülmesi için seçilen bazı dayanak noktaları ile her gün için 6 parametrelili, 3 boyutlu Helmert dönüşümü gerçekleştirilmiştir. Bu dönüşümde ölçek faktörü hesaba alınmamıştır. Ölçek faktörü GPS için problem olmamakta, hangi boyutlarda ağ olursa olsun GPS ile ağın ölçeği yüksek doğrulukla (<1 ppb) belirlenebilmektedir (**Herring, 2000**). Sonuç olarak dönüşümde yalnızca öteleme ve dönüklük parametreleri yer almaktadır.

Tektonik çalışmalarda inceleme alanının analizinde dayanak olarak alınacak referans ağı noktalarının özenle seçilmesi gerekir. Bu çalışmada referans, NASA'ya bağlı Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından önerilen noktalar seçilerek oluşturulmuştur. JPL, bu noktaların seçiminde söz konusu IGS istasyonunun

1. sismik olarak aktif bölgeler ile aktif levha sınırlarından uzak olması
2. en az 3 yıldan beri veri toplaması
3. değerlendirme aralığında aktif olarak faaliyet göstermesi
4. hızının sabit olması ve
5. zaman serisinde konumun en çok iki sıçramalı değişim göstermesi

gibi kriterleri sağlamasını öne çıkarmıştır (IGSMail-4281, 2003). Önerilen 83 istasyondan bu çalışmada kombine edilen çözümlerde toplam 74 adeti mevcuttur. Dayanak noktalarında anten ve alıcı değişikliği gibi nedenlerle ortaya çıkabilen sıçramaların belirlenmesi yoluna gidilmemiştir. Helmert dönüşümü sırasında testte uyumsuz görülen nokta dayanak noktaları, listeden çıkarılmıştır. Şekil 6.8 bu 74 dayanak noktasının yeryüzüne dağılımını ve tektonik levha sınırlarını göstermektedir. Nokta sayısının Avrasya ve Kuzey Amerika bloklarında oldukça fazla olduğu görülebilir. Ayrıca Doğu ve Güneydoğu Asya civarında yoğun tektonik aktivite nedeniyle hiç nokta olmaması zaten yeryüzünde kara ve denizlerin coğrafi dağılımı nedeniyle homojen olmayan nokta dağılımını daha da bozmaktadır. Bahsedilen bölgede bulunan ve daha önce IGS tarafından dayanak noktası olarak kullanılan SHAO ve TSKB gibi istasyonlar lineer ve sabit olmayan hızları nedeniyle önerilen listede yer almamışlardır. Haritadan ayrıca Hint ve Arap levhaları ile Pasifik ve Güney Amerika levhaları arasında kalan NAZCA bloklarının yalnızca birer dayanak noktasıyla temsil edildikleri görülebilir. Dayanak noktalarının hızının sabit olup olmadığının kontrolü, JPL'den alınan bu istasyonlara ait zaman serileriyle 2000.0-2003.0 çözüm aralığı için Wavelet dönüşümü ile de yapılmış ve noktaların periyodik hareketler dışında, lineer harekete zıt bir hareket göstermedikleri teyit edilmiştir.

Tasarlanan 24 noktalı uygulama ağı (uyga), Tablo 6.3'de verilen 6 farklı değerlendirme stratejisi ile hesaplanmıştır. 0 (Sıfır) çözümü olarak isimlendirilen ilk çözümde uydu parametreleri ve kutup hareketi parametreleri, referans oluşturulması sırasında referans istasyonları dışındaki istasyon koordinatları ile birlikte kestirilmiştir. Bu parametre yaklaşımı, küresel boyutlardaki çalışmalarda kabul görmüş bir yaklaşımdır.



Şekil 6.8 Daynak noktalarının yeryüzüne dağılımı

Nokta sayısının mümkün olduğunca yüksek seçilmesinin anlamı; noktaların yeryüzüne homojen dağılımının sağlanması ile yeryüzünde noktalar arasındaki uzaklığın azaltılması, dolayısıyla daha anlamlı çözümlerin elde edilmesidir. Ancak yeryüzünde kıta ve okyanusların dağılımı homojen bir ağ ve noktaların sık olması gibi isteklere engel teşkil etmektedir. Bu durumu göstermek için ζ ölçütü önerilmiş ve kullanılmaktadır. ζ ölçütü, nokta sayısı ve bu noktaların sınırlandığı alan kullanılmak suretiyle yeryüzünde seçilen herhangi bir noktanın en yakın referans noktasına ortalama uzaklığını ifade eder (Zumberge ve diğ., 1994). 83 nokta için bu büyüklük 1894 km'dir. Daha önce 54 noktalı IGS referans ağı için bu değer 1942 km olarak verilmiştir (IGSMail-4281, 2003). Görüldüğü gibi nokta sayısının %50 oranında artışı noktaların zorunlu coğrafi dağılımı nedeniyle ζ değerini anlamlı bir şekilde küçültmeye yetmemiştir.

Tablo 6.3 Değişik çözümler ve stratejileri

Çözüm	Kombinasyon	Bilinmeyen	Dayanak
0	igs1+2+3+aura+uyga	istasyon+uydu+kutup	74 nokta
1	igs1+2+3+aura+uyga	istasyon+kutup	74 nokta
2	uyga	istasyon+uydu+kutup	14 nokta
3	uyga	istasyon	14 nokta
4	uyga	istasyon+uydu+kutup	10 nokta
5	uyga	istasyon	10 nokta

6.2.4 Hesaplama Zamanı

Gözlemlerin değerlendirilmesinde Pentium II 350 MHz ve Pentium IV 1.7 GHz işlemcili 256 MB RAM'a sahip iki farklı platform kullanılmıştır. Platformlara GAMIT programının çalıştırılabilmesi için LINUX işletim sisteminden yararlanılmıştır. Pentium II 350 MHz işlemcili ve 256 MB RAM'e sahip bir bilgisayar ile 24 noktalı ağın bir günlük çözümü yaklaşık 3 saat zaman alırken aynı güne ait çözüm Celeron 1.7 GHz işlemci ve 256 MB RAM'i olan bilgisayarda 40 dakikada gerçekleştirilmektedir. Aynı bilgisayarlarda örnek olarak 10 noktalı bir ağın değerlendirilmesi ise sırasıyla 40 ve 9 dakika sürmüştür. Ağa ait nokta sayısının 10'dan 24'e 2.4 kat artırılması değerlendirme süresini 4.5 kat artırmıştır. Görüldüğü gibi değerlendirme süresi için lineer bir etki söz konusu değildir. 24 noktalı ağın 1096 günden oluşan 3 yıla ait verilerinin değerlendirilmesi 24 saat açık tutulmaları

halinde ilk bilgisayarda 137 gün ikincisinde ise 30 gün süreceği göz önüne alınırsa neden daha fazla noktadan oluşan bir ağ tasarlanmadığı anlaşılmış olacaktır.

Tablo 6.4 5 farklı ağ çözümüne ait çözüm dosyaları (h-dosyası) boyutu (MB biriminde)

Yıl Çözüm	2000	2001	2002	Toplam
igs1	1997	2037	1918	5952
igs2	1986	2100	1990	6076
igs3	1897	1950	1800	5647
aura	926	940	868	2734
uyga	781	805	792	2378
Toplam	7587	7832	7368	22787

Günlük çözümlerin ertesinde farklı çözümleri birleştirmek ve datum belirlemek için kullanılan dosya boyutları Tablo 6.4’de gösterilmiştir. Bu dosyalar ile yapılan 0 ve 1 çözümlerinin her biri Pentium IV bilgisayarda yaklaşık olarak 33 saat, diğer çözümlerin her biri yaklaşık 4 saatte gerçekleştirilmiştir.

6.3 Zaman Uzayında Analiz

6.3.1 Zaman Serilerinin Lineer Regresyonu

Hem Tablo 6.3’de özetlenen farklı çözümlerin karşılaştırılmasının yapılması ve hem de noktalardaki NS ve EW yönlerdeki hız bileşenlerinin kestirilmesi için lineer regresyon uygulanmıştır. Doğrusal regresyon, NS veya EW yönündeki bileşen için ayrı ayrı olmak üzere GM fonksiyonel modeliyle

$$\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 - t_1 \\ 1 & t_2 - t_1 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & t_n - t_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

biçiminde yazılabilir. Burada gözlemler l_i , NS veya EW yönlerindeki koordinat bileşenlerinin günlük çözüm değerlerini ifade eder. Eşitlikte geçen a , serinin başlangıcı olan t_1 zamanında ordinat eksenini kestiği noktayı, b ise serinin eğimini ya da noktanın ilgili bileşende hızını göstermektedir. Stokastik model

$$\sum_{ll} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} \frac{\sigma_1^2}{\sigma_0^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_2^2}{\sigma_0^2} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \frac{\sigma_n^2}{\sigma_0^2} \end{bmatrix} \quad (6.10)$$

şeklinde elde edilmiştir. Yukarıda açıklandığı gibi Helmert dönüşümü sonrasında noktaların koordinat bileşenlerinin doğrulukları her gün için belirlenebildiğinden zaman serisinde bu değerler de beraberinde verilmektedir. Zaman serisinden çözümlerin günlük doğruluklarından medyan değeri seçilerek öncül standart sapma σ_0 belirlenebilir.

Çeşitli nedenlerle serinin genel gidişine aykırı olarak ortaya çıkan uyuşumsuz değerler robust kestirim yöntemi ile elimine edilerek ölçü kümesinden çıkarılmıştır. Robust kestirim yöntemi olarak birçok alternatif olup bunlardan Huber kestirimi benimsenmiştir (Akçın, 1998; Yaşayan, 1992). (6.9) ve (6.10)'da verilen GMM bileşenleri ile yapılan parametre kestirimi ertesinde elde edilen düzeltme değerleri, p_i ölçülerin ağırlığını göstermek üzere

$$|v_i| < c \quad p_i = 1 \quad (6.11)$$

$$|v_i| \geq c \quad p_i = \frac{c}{|v_i|}$$

biçiminde ağırlıkların bir sonraki çözüm adımı için belirlenmesinde kullanılmıştır. (6.11)'de geçen c değeri için $c = 3\sigma_0$ alınmıştır. Bu şekilde belirli bir adımda ağırlık değerleri yakınsamaya başladığında (6.11) ile bulunan ve $p_i < 1$ olan noktalar seriden çıkarılmıştır. Ölçülerin redundans payları r_i 1'e çok yakın olduğundan kaba hatalı ve uyuşumsuz olarak sınıflandırılan noktalar için düzeltmeler esas alınmıştır. Zira düzeltmeler,

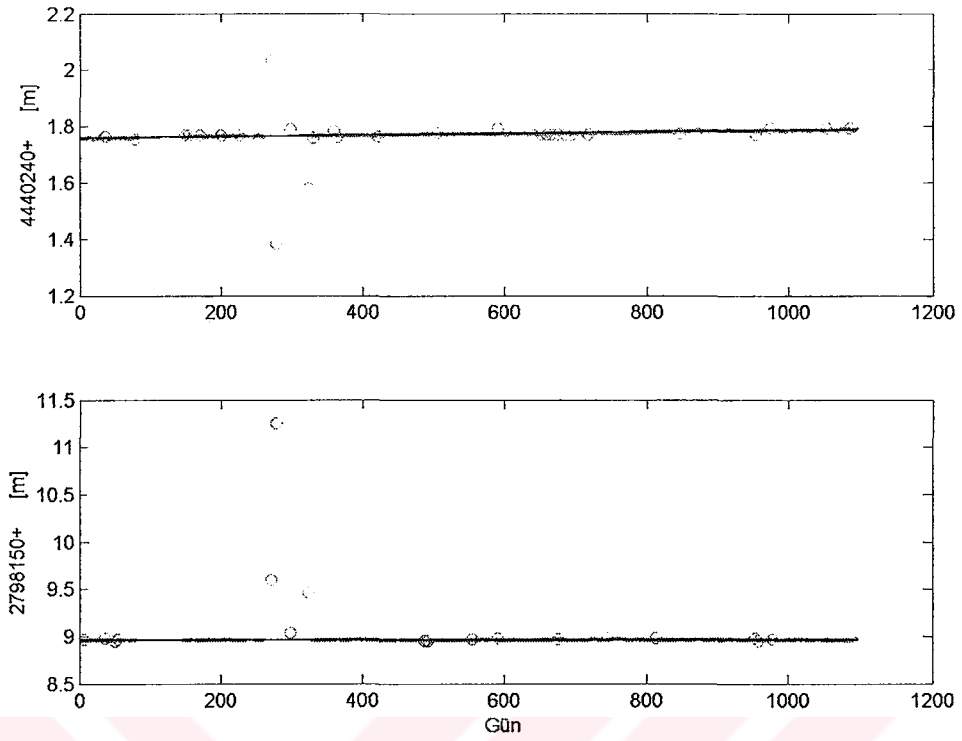
$$\nabla l_i = \frac{-v_i}{r_i} \cong -v_i \quad (6.12)$$

eşitliğinden de görüleceği üzere kaba hatalı veya uyuşumsuz ölçünün doğrudan göstergesi olmaktadır (Ayan, 1992). Zaman serilerinin lineer regresyonla çözümü ile kaba ve uyuşumsuz ölçülerin seriden eliminasyonu için MATLAB’da yazılan makrolardan yararlanılmıştır. Örnek olarak kombinasyon sonucunda ANKR istasyonuna ait NS ve EW bileşenleri zaman serisinin kaba hatalı ölçülerle ve bu ölçüler elimine edildikten sonraki dağılımı Şekil 6.9 ve 6.10’da görülmektedir. Şekilde küçük halkalarla gösterilen noktalar kaba hatalı çözümleri göstermektedir. Toplam 928 gün çözüm üretilen ANKR noktasında kaba hatalı nokta sayısı NS bileşeninde 37 iken EW bileşeninde 19’dur. Bir başka örnek olarak Şekil 6.11 ve 6.12’de ISTA istasyonunun bileşenlerine ait zaman serisi gri noktalarla görülmektedir. Her iki seriden 700. gün civarında başlayan ve istasyonun bilgisayar arızası yüzünden yaklaşık 60 gün veri alınamaması ile sonuçlanan boşluk görülebilmektedir. Bu türden veri kesilmeleri sabit istasyonlarda sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Aynı şekillerde her iki bileşene ait yukarıda verilen GM modeli ile kestirilen hızlar seride koyu renkli olarak gösterilmiştir. Bu kestirim sonucunda 5.5 mm/yıl ve 28.9 mm/yıl büyüklüğündeki hız bileşenleri sırasıyla ± 0.08 ve ± 0.09 mm doğruluk ile bulunmuştur. Bu değerlerin kritiği ilerleyen bölümlerde yer almaktadır.

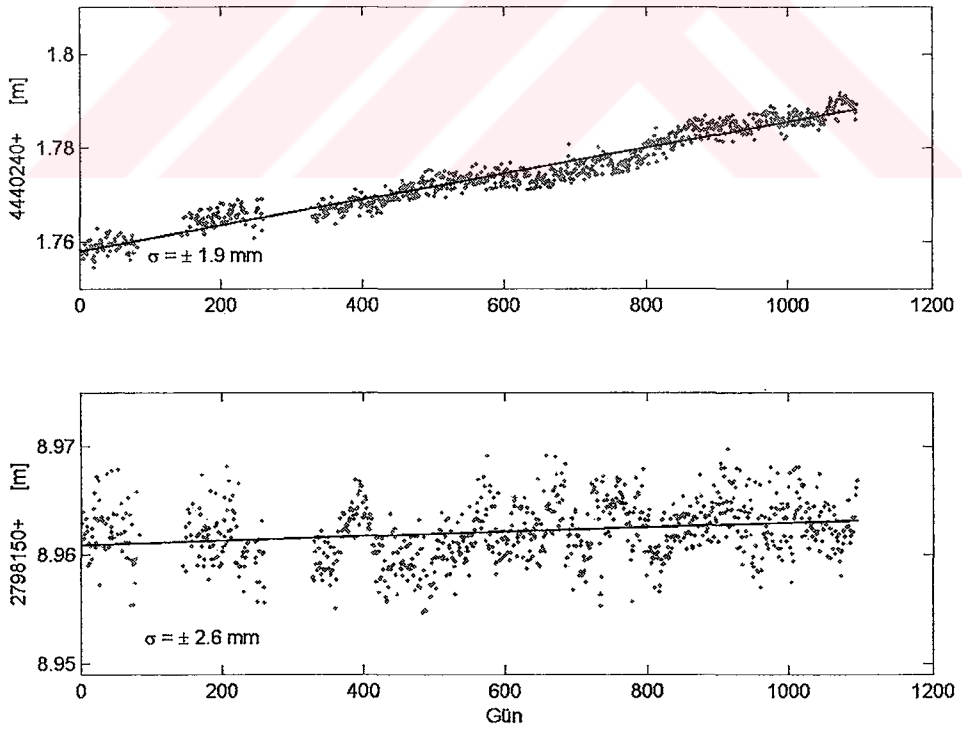
Zaman serisinde her bir noktanın günlük çözümlerden elde edilen doğruluğu ile serinin lineer regresyon sonrası elde edilen uzun dönemli doğruluğu çoğu istasyon için birbirine oldukça yakın olarak elde edilmiştir. Bunun göstergesi, regresyon sonrası elde edilen a posteriori doğruluk değerinin a priori değerine oranının 1’e çok yakın çıkmasıdır. Normlandırılmış karesel ortalama hata olarak isimlendirilen bu ölçütün karesi model testi için kullanılan

$$\frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \sim F_{n-u, \infty, 1-\alpha} \quad (6.13)$$

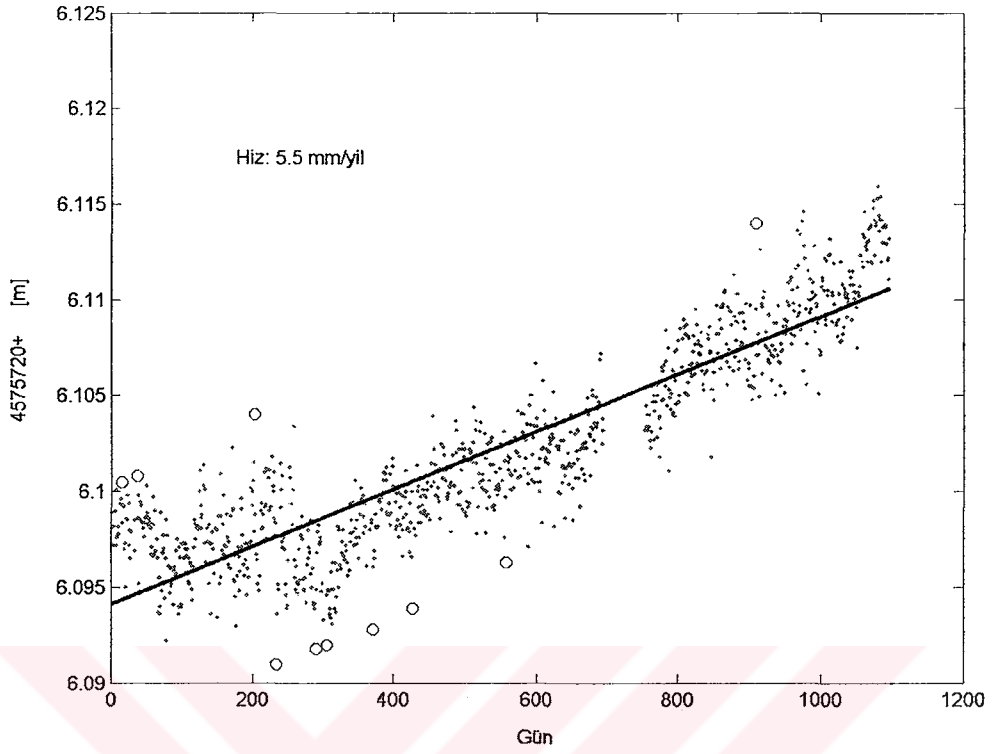
$n-u$ ve ∞ serbestlik dereceli ve α yanılma olasılıklı Fisher dağılımındadır. $n-u$ serbestlik derecesi ve $\alpha = 0.05$ yanılma olasılığı için, Fisher dağılımından elde edilen eşik değeri hiçbir zaman aşılmamıştır. Sonuç olarak kısa dönemli ve uzun dönemli doğruluklar birbiriyle uyumludur denilebilir.



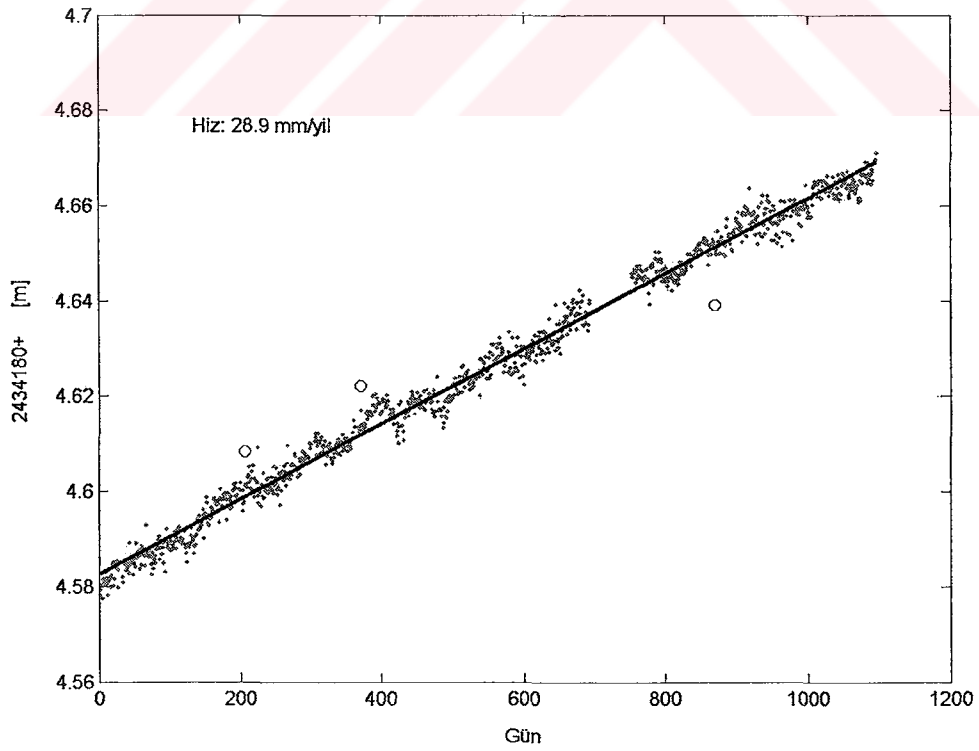
Şekil 6.9 ANKR NS ve EW bileşenleri zaman serisi (kaba hatalı ölçülerle birlikte)



Şekil 6.10 ANKR NS ve EW bileşenlerinin kaba hatalı ölçüler elimine edildikten sonraki zaman serisi



Şekil 6.11 ISTA NS bileşeni zaman serisi ve lineer regresyonu



Şekil 6.12 ISTA EW bileşeni zaman serisi ve lineer regresyonu

6.3.2 Lineer Regresyon Sonuçlarının Karşılaştırılması

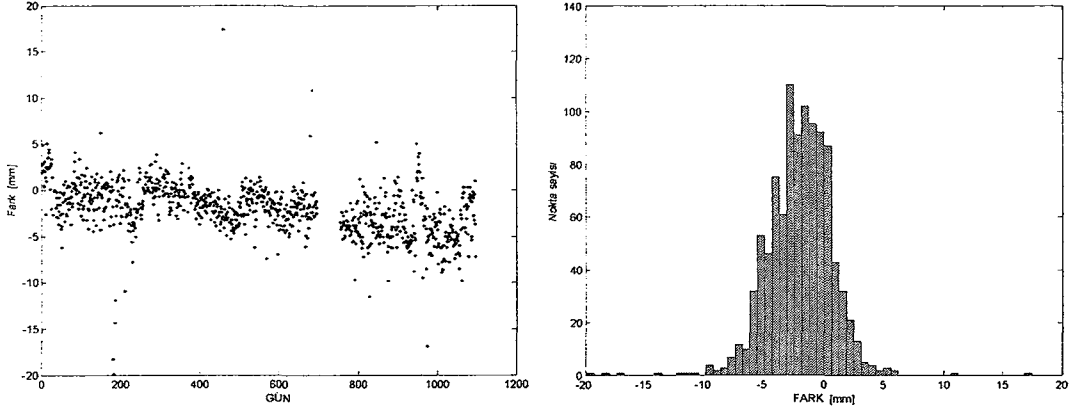
Lineer regresyon sonucunda 2000.0 zamanı için konum bileşenlerinin sıfır çözümünden olan farkları Tablo 6.5’de görülmektedir. 2 ve 3 çözümlerinde uygun olmayan datum noktaları seçimi, noktaların konumlarını önemli ölçüde etkilemiştir. Yalnızca istasyon koordinatlarının bilinmeyen olarak alındığı 3 çözümü ile özellikle NS bileşeninde olmak üzere daha az sapma bulunmasına rağmen, yanlış datum seçiminin etkisi, büyük koordinat farklarında mevcuttur. 5 çözümünde, 4 çözümüne kıyasla farklar daha azdır. Farkların, NS bileşeninde ± 1 mm, EW bileşeninde ± 1.2 mm doğrulukla bulunduğu göz önüne alınırsa 5 çözümü ve hatta hemen hemen sınırdan olmak üzere 4 çözümü de kabul edilebilir çözümler olduğu görülmüştür. Seçilen ağ geometrisinin etkisi ve noktaların komşuluk ilişkisi nedeniyle farklar aynı işaretli olarak ortaya çıkmışlardır.

Tablo 6.5 Uygulama ağında farklı çözümlerden elde edilen konum bileşenlerinin karşılaştırılması (mm)

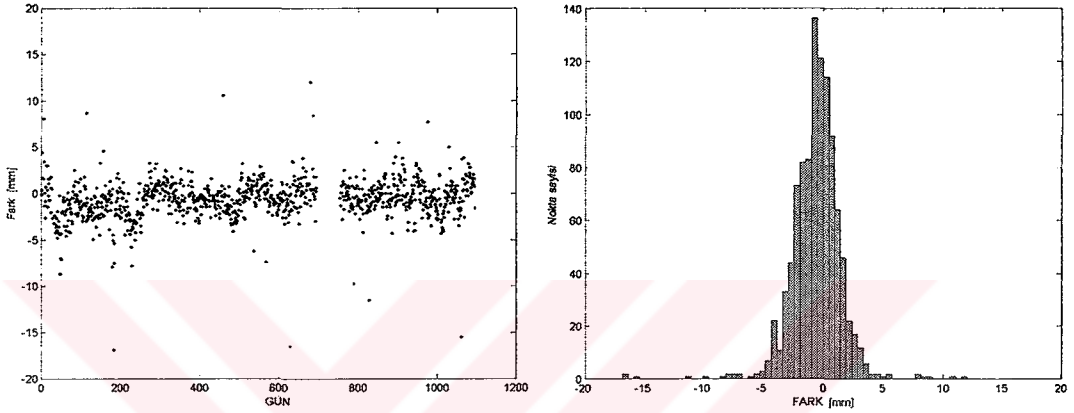
	1-0		2-0		3-0		4-0		5-0	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
ANKR	0.1	0.6	1.8	-3.9	-0.2	-2.8	2.4	-1.2	1.4	0.7
ISTA	0.0	0.6	1.7	-4.2	-0.2	-3.1	2.6	-1.3	0.7	0.0
TRAB	-0.1	0.5	1.0	-3.2	-0.5	-1.9	1.2	-0.1	1.4	1.6
TUBI	-0.1	0.7	1.7	-4.5	-0.1	-3.0	2.6	-1.5	1.0	0.2

Bu sayısal değerler 1096 günlük ortalamaların farklarıdır. Bunların günlük değişimleriyle histogramları ISTA noktası örneğinde görülmektedir Şekil 6.13’den farkların bazı günlerde 20 mm’ye ulaşabildiği görülmektedir. Histogramdan da görüleceği gibi farklar sıfır etrafında değil sola doğru kaymış bir merkez etrafında kümelenmişlerdir. Söz konusu kayıklık -2 mm olarak bulunmuştur. 5 çözümü için verilen Şekil 6.13b’de ise kayıklık -0.6 mm olup histogram daha dar ortaya çıkmıştır.

JPL tarafından referans noktası olarak alınabilecek nitelikte 83 adet noktadan çalışmada elde edilen ağda mevcut 74 nokta ile oluşturulan datum ve diğer noktadaki hız vektörleri ise Şekil 6.14’de görülmektedir. Bazı istasyonların zaman serileri kısa dönemli olduklarından bunların lineer regresyonu ile elde edilen hız vektörleri şekilde gösterilmemiştir. Hız vektörleri, ITRF97 sistemindeki mutlak



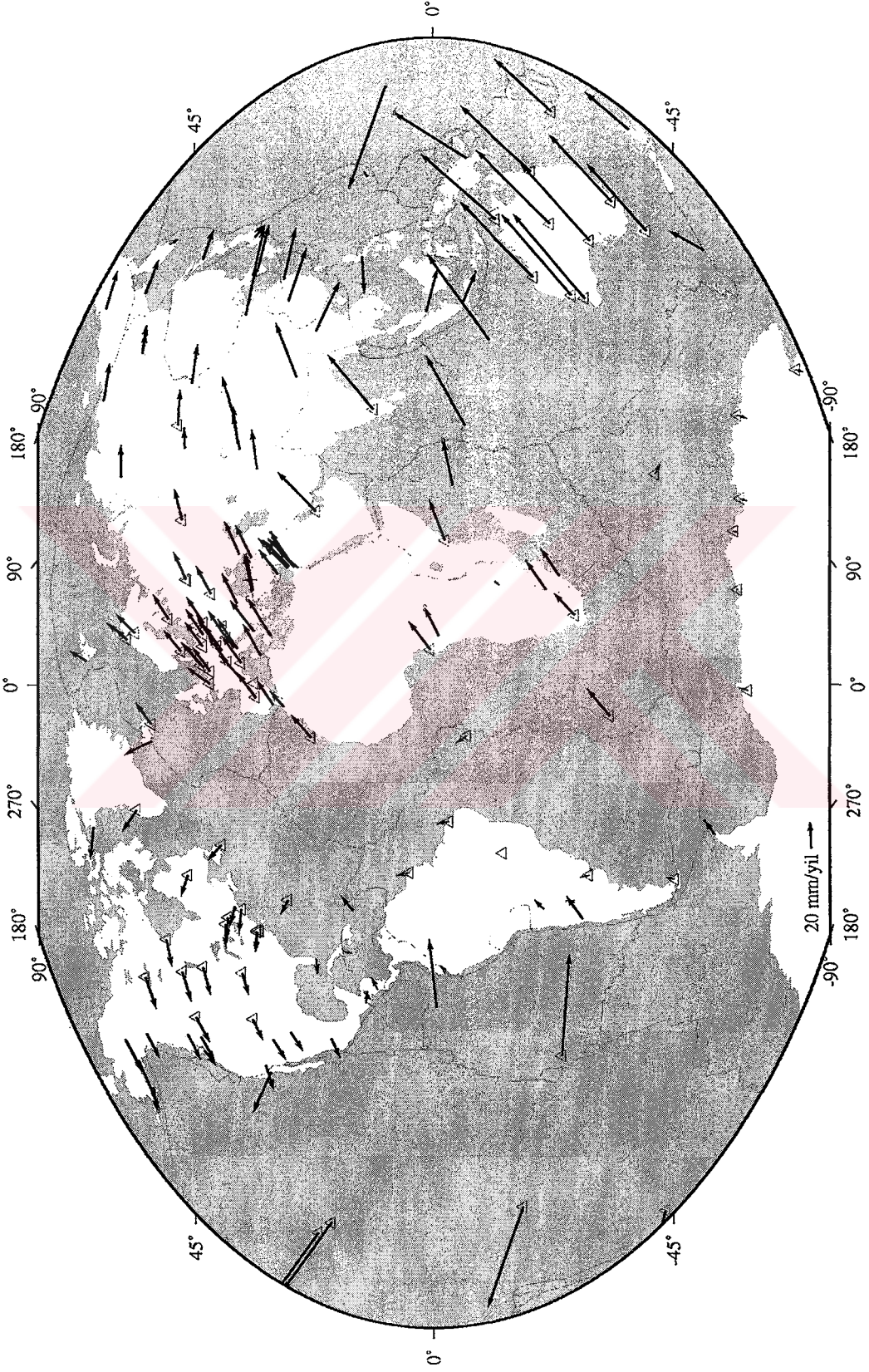
a) 3 ve 0 çözümü farkları



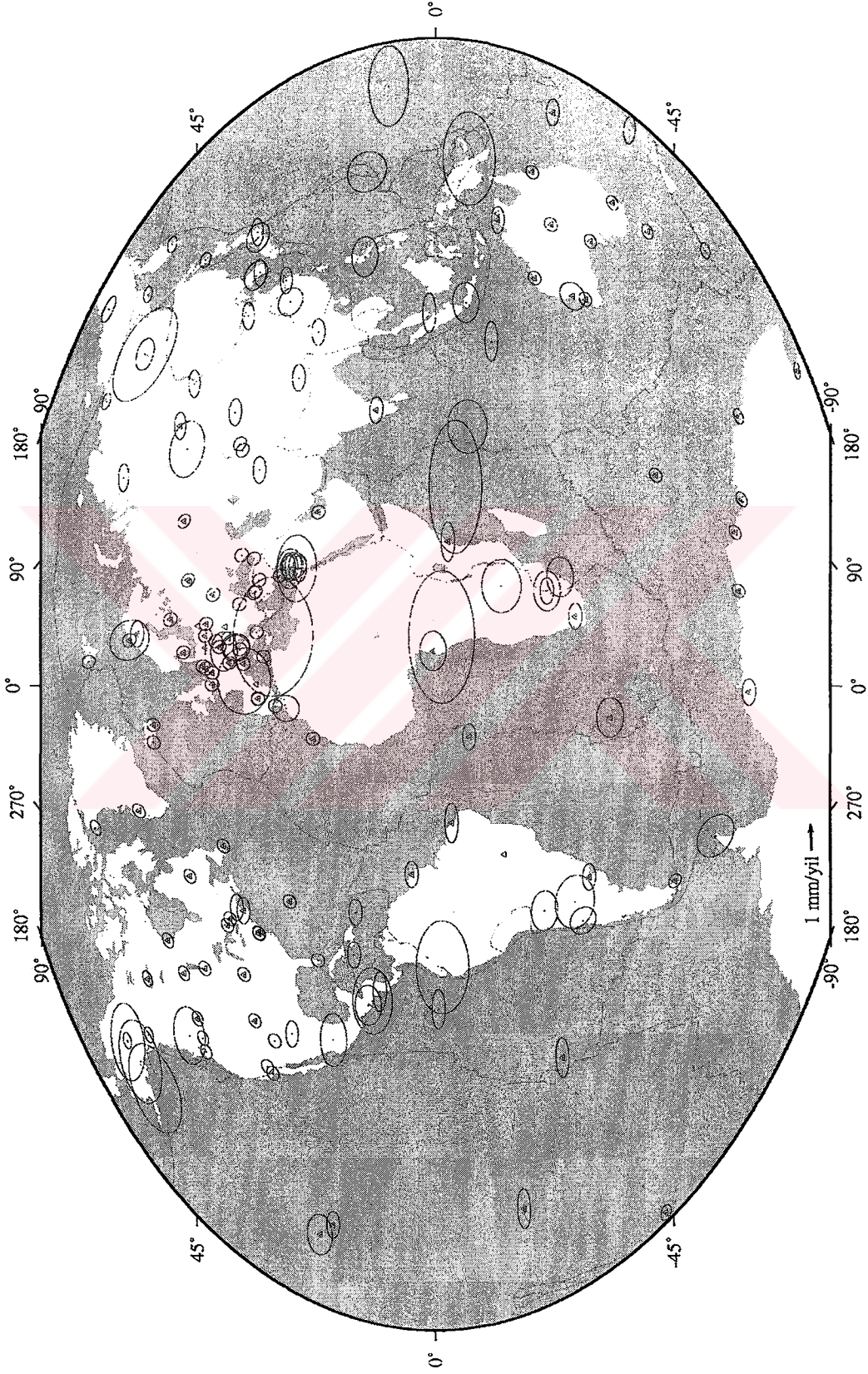
b) 5 ve 0 çözümü farkları

Şekil 6.13 ISTA EW koordinat zaman serilerinin değişik çözümlerinin sıfır çözümü ile karşılaştırılması

hızları göstermektedirler. Yeryüzünde en hızlı hareket Avustralya ve Pasifik levhalarında görülmektedir. Hareketin hemen hemen hiç olmadığı levha ise Antarktika levhasıdır. Kuzey ve Güney Amerika levhaları ile Avrasya ve Afrika levhaları, bunları ayıran Atlantik yarığında dışa doğru hareket etmektedirler. Kuzey Amerika ve Avrasya levhalarındaki nokta çokluğu nedeniyle bu levhalar sanki birer nokta etrafında dönme hareketi yapıyormuş izlenimi vermektedir. Şekil 6.15, Şekil 6.14'de verilen hız bileşenlerinin güven elipslerini göstermektedir. Daha önce Şekil 6.5'de vurgulanan durum bu şekilde açık olarak görülmektedir. Güven elipslerinin büyük yarı eksenlerinin doğu-batı doğrultusunda olması, NS yönündeki bileşenlerin EW yönüne nazaran daha iyi kestirildiklerinin bir göstergesidir. Ekvator bölgesinde elipsler, kuzey ve güney enlemlerindeki noktalarda elde edilen elipslere nazaran daha büyüktür. Ayrıca doğu ve güneydoğu Asya civarında yeterince referans noktası alınamadığı için burada da elipslerin büyüklükleri aynı enlemlerdeki elipslerle karşılaştırmalı olarak daha büyük elde edilmiştir. Kuzey yarımkürede nokta



Şekil 6.14 İstasyonlardaki hız vektörleri

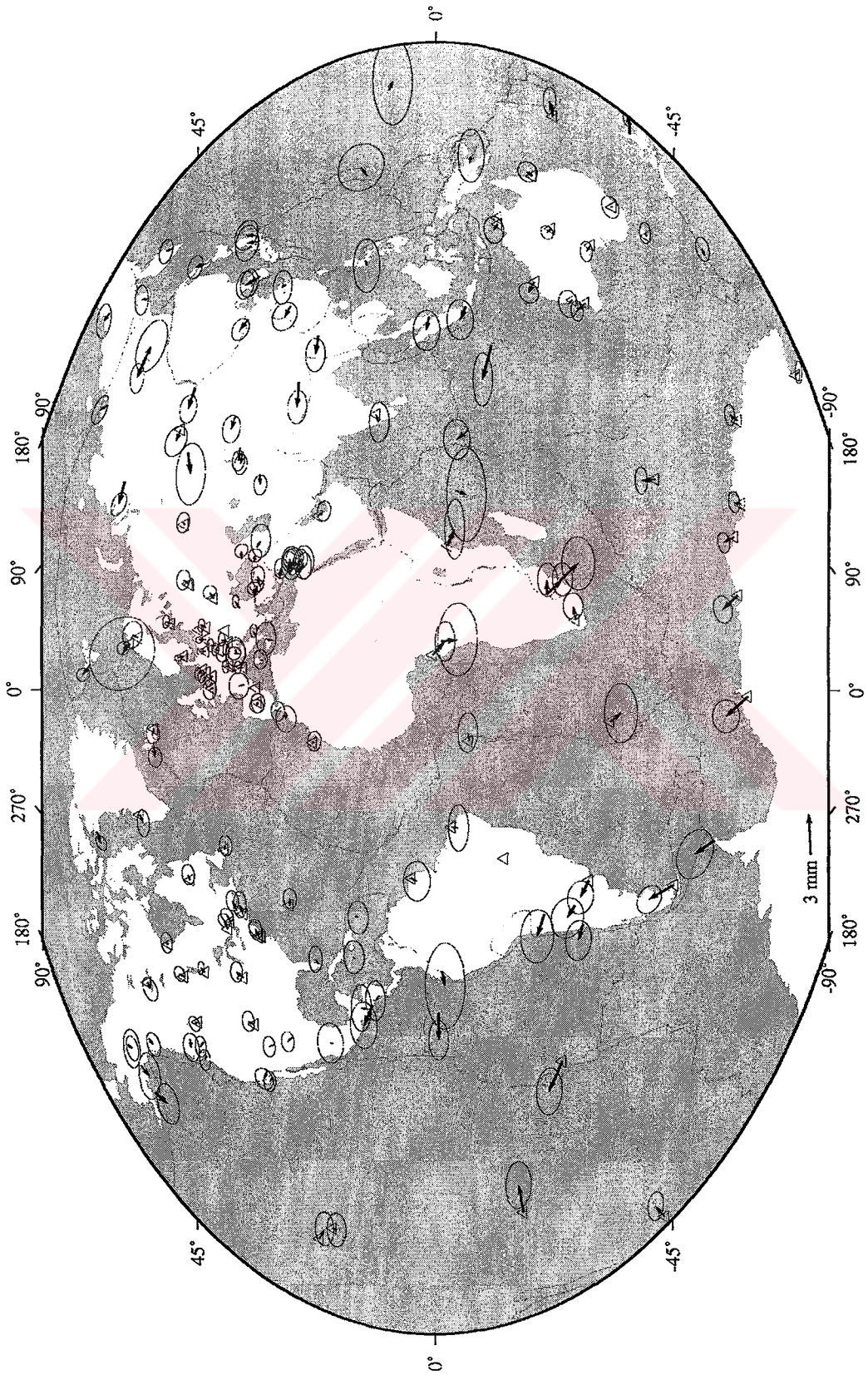


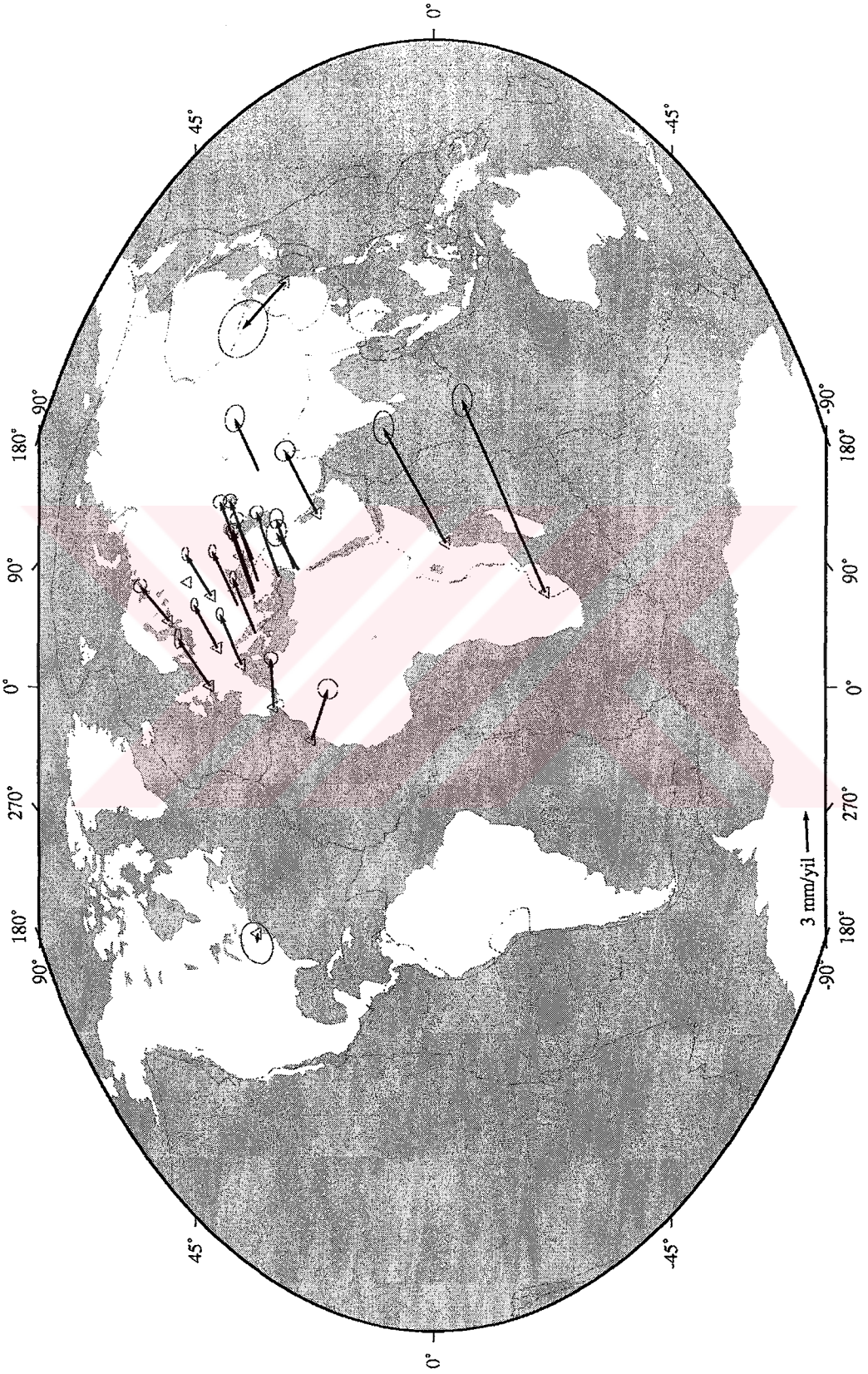
Şekil 6.15 Hız vektörlerinin güven elipsleri

sıklığının uygunluğu ve referans noktasının güney yarım küreye nazaran fazla oluşu elipslerin boyutunda belirleyici etken olmaktadır. Örneğin Kuzey Amerika'da 35-60° enlemleri civarında 15'e yakın dayanak noktasının uygun dağılımıyla elde edilen güven elipsleri, Güney Amerika'da aynı enlemlerde elde edilen elipslere kıyasla daha küçüktür. Dayanak noktalarının birbirine yakın ve sık oluşu doğruluğu etkileyen önemli bir faktör olmaktadır.

Tablo 6.3'de görüldüğü gibi sıfır çözümünde istasyon, uydu ve kutup parametreleri hep birlikte kestirilmiştir. Ancak uydu yörüngelerinin dış doğruluğunun 5 cm doğrulukla verildiği göz önüne alınırsa yörünge parametrelerinin sabit alınması çözümü nasıl etkileyecektir? Bu soruya yanıt aramak için 0 ve 1 no'lu çözümler karşılaştırılmalıdır. Şekil 6.16 her iki çözüm için elde edilen konumların farkını ve bu farkların güven elipslerini göstermektedir. Farkların rasgele dağılımı, çözümlerin sistematik bir etki altında olmadığını göstermektedir. Çok az noktada anlamlı farklar ortaya çıkmıştır. Her iki çözümle bulunan hız vektörlerinin farklarının da anlamlı olmadığı gözlenmiştir. Sonuç olarak uydu parametrelerinin dahil edilmediği bu çözüm ile sıfır çözümü aynı sonuçları üretmiştir denilebilir. Ancak regresyon parametrelerinin kestiriminde bu çözümle daha fazla sayıda uyuşumsuz ölçü gözlem kümesinden çıkarılmıştır. Çıkarılan gözlem sayısı, sıfır çözümünde her iki bileşende de uyuşumsuz olarak sınıflandırılan gözlemlerden %30 daha fazladır. Buradan uydu parametrelerinin kestirilmediği bir çözümün, sonuçların tekrarlama doğruluğunu azaltıcı etki yaptığı söylenebilir.

Bu çalışma için tasarlanan uyağı çözümüne, yukarıda açıklanan iki çözümün aksine başka hiçbir çözümle kombinasyonu yapılmamış, ağdaki 24 noktadan ağı çevreleyen en dıştaki 14 nokta dayanak alınmak suretiyle referans teşkil edilmiştir. 2 no'lu çözüm bütün parametrelerin bilinmeyen, 3 no'lu çözüm ise yalnızca istasyon koordinatlarının bilinmeyen alındığı, diğer parametrelerin elimine edildiği çözümü ifade etmektedir. Dayanak olarak seçilen 14 noktadan 10'u JPL'in önerdiği listede yer alan noktalar olup kalan 4 nokta HRAO, SFER, SHAO ve ZECK noktalarıdır. SHAO noktası daha önce IGS'in 54 noktalı referans listesinde yer almaktaydı. Ancak JPL'in Bölüm 6.2.3'de verilen kriterlerinden aktif sismik bölgelerden uzak olma şartını sağlamadığından yine JPL tarafından bu listeden çıkarılması önerilmektedir (IGSMail-4281, 2003). 2 çözümü için Şekil 6.17'de verilen hız bileşenlerinin farkından 14 noktalı referans sisteminin doğru bir referans olmadığı





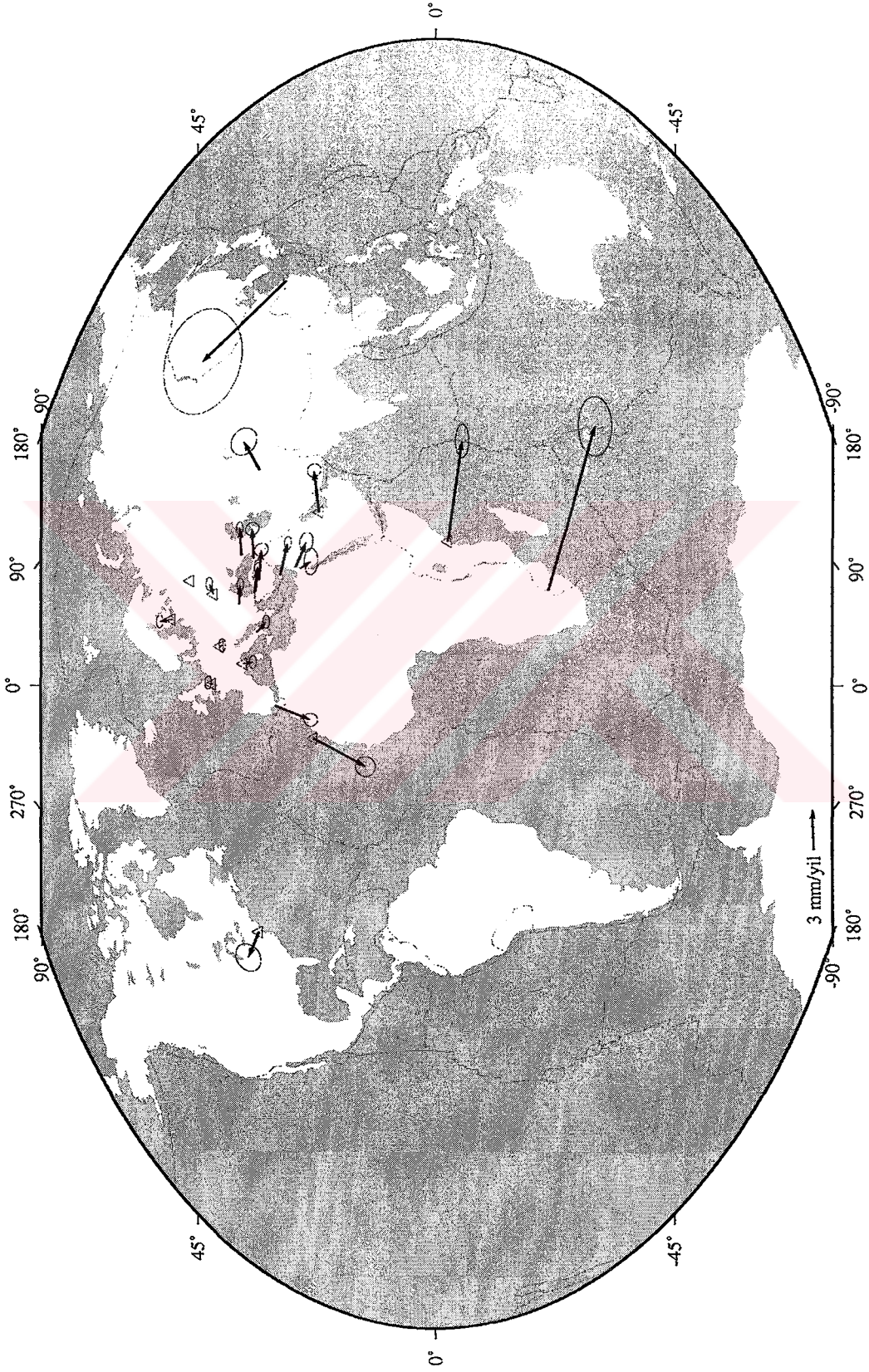
Şekil 6.17 Sıfır ve 2 çözümü hız farkları

görülebilmektedir. 3 çözümü ile elde edilen hız bileşenlerinin farkı 2 çözümüyle elde edilenle hemen hemen aynıdır.

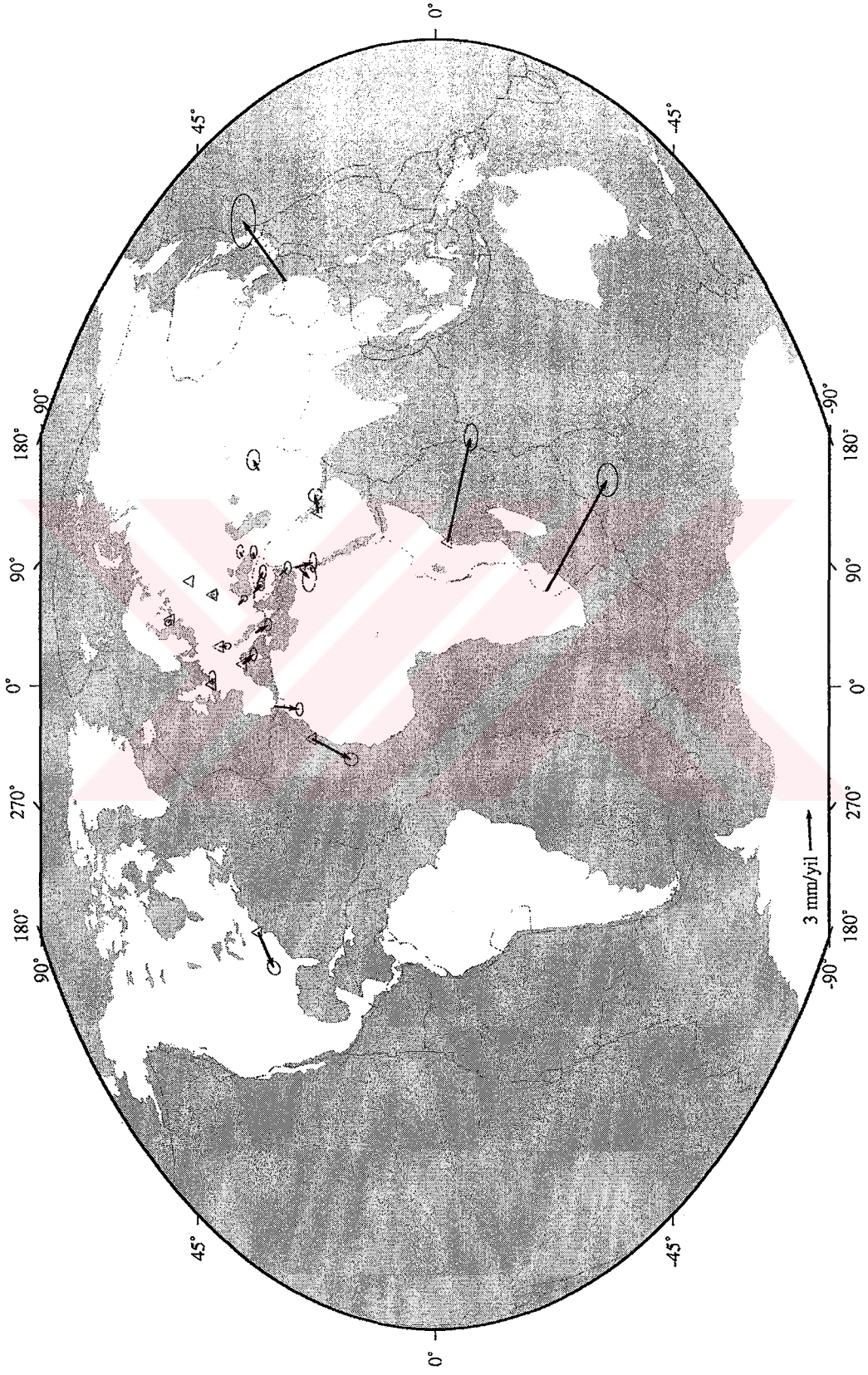
Dayanak noktalarının, Tablo 6.3’de verilen 4 ve 5 çözümünde JPL tarafından önerilen listeden olmak üzere 10 adet seçilmesi durumunda Şekil 6.18 ve 6.19’de görüldüğü gibi hız bileşenlerindeki farklar azalmaktadır. Hatta yalnızca istasyon koordinatlarının kestirildiği 5 çözümünde Anadolu ve çevresini incelemeye yönelik tasarlanan ağın incelenecek kesimde hız farklarının ihmal edilebilir seviyede olduğu gözlenmektedir. Aynı etkiler konum bileşenleri için de gözlenmiştir. 2, 3, 4 ve 5 no’lu çözümlerle elde edilen sonuçlar topluca değerlendirildiğinde dayanak noktalarının uygun seçiminin sonuçları nasıl etkileyebildiği kolaylıkla görülmektedir. Bölgesel çalışmalarda yalnızca o bölge çevresinde nokta seçilmesi yeterli olmayıp mümkün olduğunca bölge dışına taşılmalıdır. Bu, stabil dayanak noktası bulma olasılığını yükseltecek dolayısıyla çalışmaların doğruluğunu artırıcı etki yapacaktır.

Şimdiye kadar bütün çözümler ITRF97 sisteminde yapılarak hız bileşenleri bulunmuştur. Mart 2001’de resmi olarak kullanıma sunulan ITRF2000 ile ITRF97 sistemindeki hızlar karşılaştırıldığında Şekil 6.20’deki gibi bir durum elde edilmiştir. Kuzey Amerika’nın doğu kesimindeki bazı noktalar ihmal edilirse hız vektörleri sanki bir nokta etrafında dönüyormuş gibi bir sistematik göstermektedirler. Vektörler Avrupa civarında minimum iken Avustralya ve Antarktika’da maksimuma ulaşmaktadır. Dönme etkisi, Şekil 6.21’de NS bileşeni histogramında sıfır değerinin sağında ve solunda iki farklı kümelenmeyle de kendisini göstermektedir.

GAMIT ve GLOBK ile elde edilen çözümlerin, bağımsız çözümlerle karşılaştırılması bu çözümlerin dış doğruluğu hakkında fikir verecektir. Bu maksatla NASA’ya bağlı JPL (Jet Propulsion Laboratory) tarafından üretilen zaman serileri karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. JPL, IGS istasyonlarında alınan GPS gözlemlerini PPP (Precise Point Positioning) denen hassas mutlak konum belirleme algoritması ile değerlendirmekte ve zaman serileri üretmektedir. PPP ile her istasyondaki GPS gözlemi bağımsız olarak ele alınır ve ikili farklar oluşturulmadan ham gözlemler kullanılmak suretiyle çözüm yapılır. Algoritmanın bir başka özelliği gözlemlerin değerlendirilmesi için bir ağ yapısına ihtiyaç olmamasıdır. Bu algoritma JPL’in ürettiği GIPSY/OASIS programında gerçekleştirilmiştir. Bu konuda ayrıntılar Kuang ve diğ. (1996), Zumberge ve diğ. (1997), Menge ve diğ. (2000) ve



Şekil 6.18 Sıfır ve 4 çözümü hız farkları



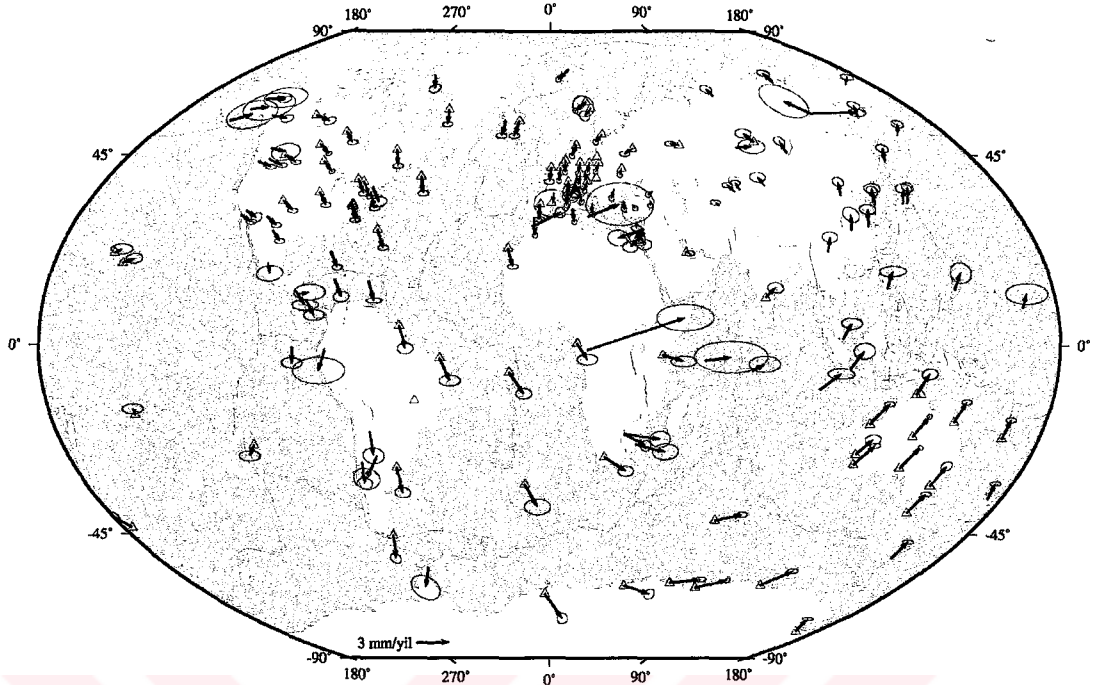
Şekil 6.19 Sıfır ve 5 çözümü hız farkları

Wübbena (2001)'de bulunabilir. JPL'in ITRF2000 sisteminde elde edilen zaman serileri ile bu çalışmada elde edilen serilerden elde edilen hız bileşenleri Şekil 6.22'de karşılaştırılmıştır. Farklar tektonik levhalara göre bir sistematik göstermektedirler. Farklar Kuzey Amerika'da kuzey yönünde uzanırken, Avrupa'da batı yönünde uzanmaktadır. Farkların bütünü için bir sistematiklik olmadığı Şekil 6.23'de iki bileşene ait histogramlardan görülebilir. NS yönünde JPL ile bulunan hızlar daha küçük olup kayıklık 0.8 mm'dir. EW yönünde ise JPL çözümleri ile noktalar daha hızlı olarak ortaya çıkmakta ve kayıklık -0.8 mm bulunmaktadır. Her iki yön bileşenlerinin doğruluğu ± 1.4 mm olarak bulunmuştur.

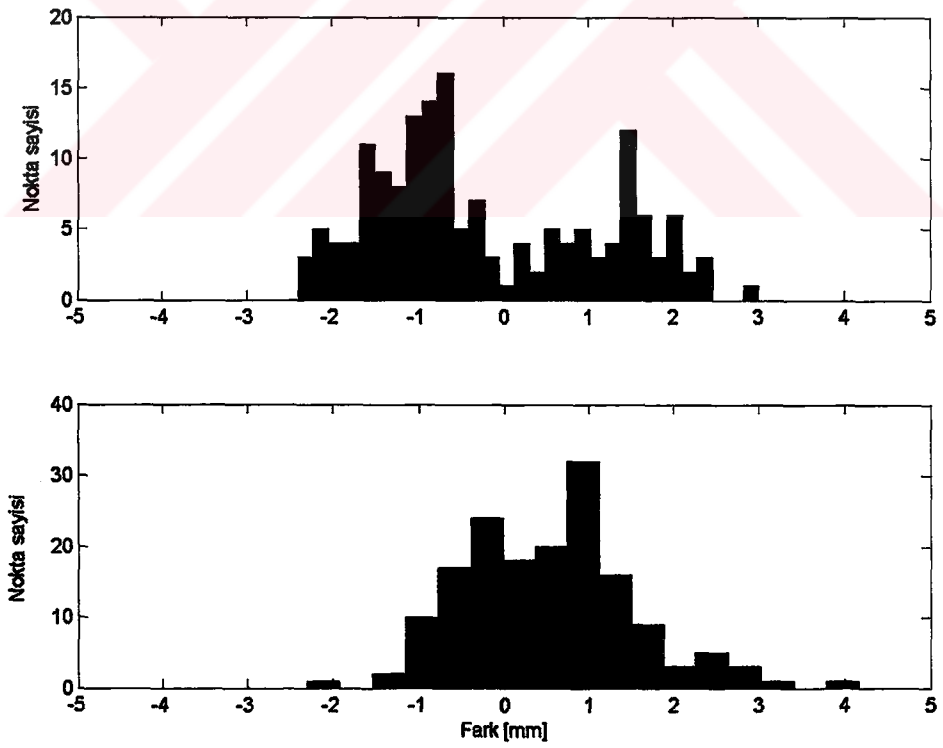
6.4 Frekans Uzayında Analiz

Bir önceki bölümde yeryüzündeki plakaları temsil eden ağ noktalarının zamana bağlı değişimleri incelenmiştir. Bu incelemede lineer trend esas alınmıştır. Bu bakış açısı periyodik değişimleri de içine alan bir modelleme yapılması gerekli midir sorusuna yanıt verememektedir. Zira yer üzerindeki noktalar, yüksek ve düşük frekanslı hareketlere maruz kalabilmektedirler. Gel-git etkisi olarak ortaya çıkan hareketler modellenenbilmektedir. Ancak modellenemeyen atmosferik ve hidrolojik ya da noktanın etrafındaki lokal su seviyesinin mevsimsel değişimi, noktaların periyodik hareketler yapmasına neden olmaktadır (**van Dam ve Herring, 1994; van Dam ve diğ., 2001; Dong ve diğ., 2002**). Zaman serilerinin Fourier veya güç spektrumunun oluşturulması frekans uzayında inceleme yapma olanağını yaratacak dolayısıyla serideki periyodik değişimleri görülebilir kılacaktır.

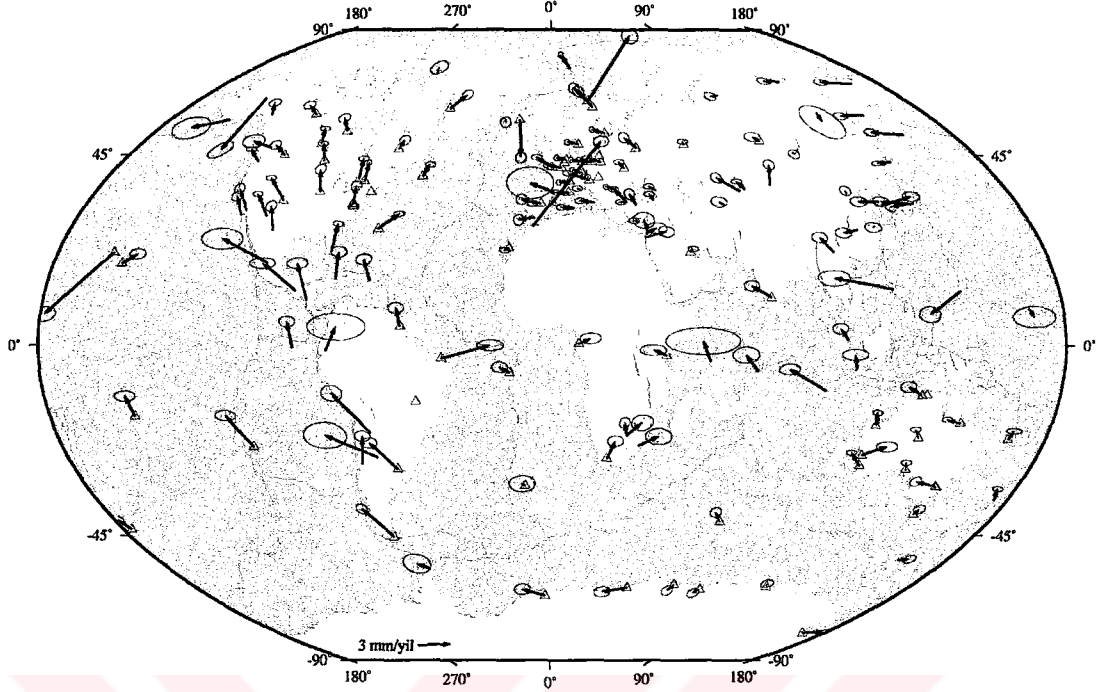
Fourier dönüşümü ile frekans uzayına dönüşüm ancak eşit aralıklı bir veri yapısı halinde mümkündür. Ayrıca seri ardışık olsa bile seride kaba ve uyuşumsuz ölçüler olması durumunda bu noktalar seriden çıkarılacak dolayısıyla yine ardışık olmayan bir seri ile karşı karşıya kalınacaktır. Eğer seride çok az sayıda noktada veri alınamamışsa bu seriyi homojenize etmenin en iyi yolu bu noktalardaki gözlem değerlerinin yine bu noktalara en yakın seri değerine eşit alınmasıdır. ISTA istasyonu örneğinde olduğu gibi yaklaşık 9 hafta süreyle veri kaydedilememesi durumunda bu büyük boşluk nasıl doldurulacaktır? Bu aralıkta çeşitli enterpolasyon yöntemleri kullanılarak seri eşit aralıklı hale getirilebilir (**Press ve diğ., 1999**). Bu çalışmada Fourier dönüşümü yerine 5. Bölümde ele alınan ve eşit aralıklı olmayan verilerde spektrum hesabını sağlayan Lomb-Scargle periodogram yöntemi kullanılmıştır.



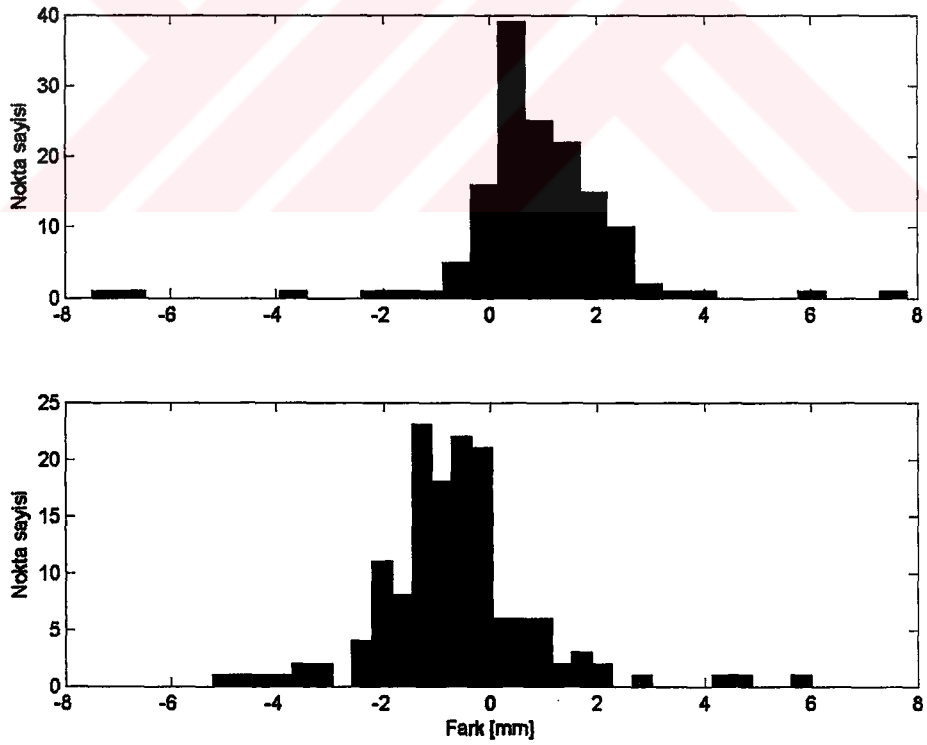
Şekil 6.20 ITRF97 ve ITRF2000 hız bileşenleri farkı



Şekil 6.21 ITRF97 ve ITRF2000 NS (üstte) ve EW bileşenleri hız farkları



Şekil 6.22 JPL ve bu çalışmada bulunan hız bileşenleri farkı

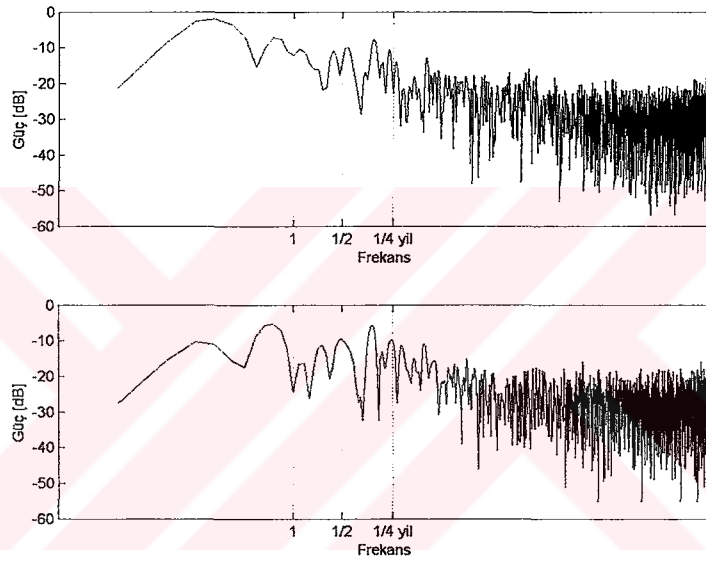


Şekil 6.23 JPL ve bu çalışmada bulunan NS (üstte) ve EW bileşenleri hız farkları

Şekil 6.11 ve 6.12’de verilen ISTA zaman serilerinin trendi elimine edildikten sonra bulunan düzeltmelerin (5.24) eşitliği ile hesaplanan spektrumu Şekil 6.24’de görülmektedir. Şekilde yatay eksen frekans bileşeninin logaritmik değerlerini, dikey eksen ise

$$P_{dB}(f_k) = 10 \log_{10} \left(\frac{2P(f_k)}{f_s} \right) \quad (6.14)$$

eşitliği ile hesaplanacak desibel (dB) biriminde güç spektrumunu ifade etmektedir. (6.14)’de f_s ile verilen, örnekleme aralığı frekansı olup 1/(1 gün) şeklindedir.



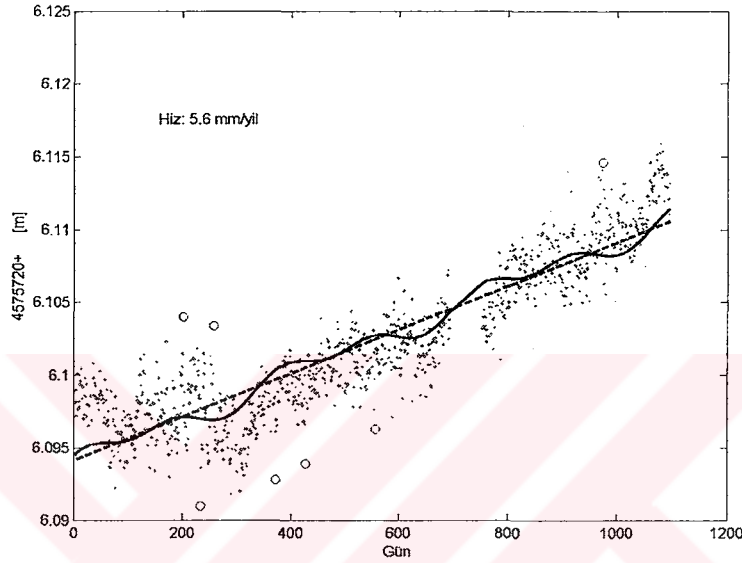
Şekil 6.24 ISTA zaman serileri güç spektrumu (üstte NS, altta EW bileşeni)

Şekilden serinin yıllık, 6 aylık ve diğer harmoniklerde azalan bir şekilde maksimum oluşturduğu görülebilir. Bu durumda (6.9)’da verilen lineer regresyon fonksiyonel modeli yıllık ve yarı-yıllık genlikleri de kestirecek şekilde genişletilirse

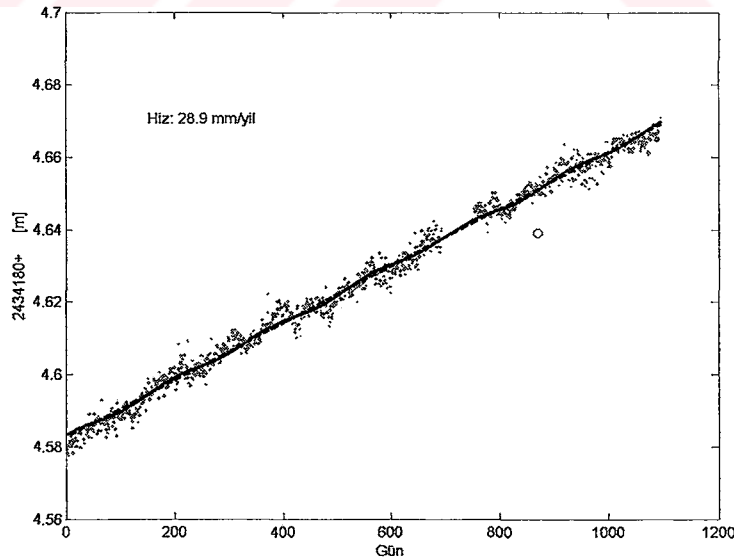
$$l_i + v_i = a + b(t_i - t_1) + s_1 \sin(2\pi(t_i - t_1)) + c_1 \cos(2\pi(t_i - t_1)) + s_2 \sin(4\pi(t_i - t_1)) + c_2 \cos(4\pi(t_i - t_1)) \quad (6.15)$$

elde edilir. Eşitlikte geçen s_1 ve c_1 yıllık, s_2 ve c_2 yarı-yıllık periyodik hareketi ifade eden bileşenlerdir (Nikolaidis, 2002). Lineer regresyona, yıllık ve yarı-yıllık etkilerin dahil edilmesi, yüksek dereceden salınımları görmek bakımından önemlidir. (6.15) eşitliğine diğer harmonik bileşenleri katmak da mümkündür ancak bu elde

edilen doğruluğu düşürecektir (Blewitt ve Lavallée, 2002). Yarı-yıllık ve yıllık etkilerin dahil edilmesiyle Şekil 6.11 ve 6.12’de verilen ISTA zaman serilerinden bulunan çözümler Şekil 6.25 ve 6.26’da koyu çizgiyle gösterilmiştir. NS bileşeni için yarı-yıllık ve yıllık genlikler sırasıyla 0.5 ± 0.14 ve 0.6 ± 0.14 mm, EW bileşeni için ise 0.74 ± 0.14 ve 0.17 ± 0.14 mm bulunmuştur. Lineer regresyonla bulunan NS hızı 5.5 mm iken harmonikler katılarak bulunan çözüm 5.6 mm olmuştur. Bu etki

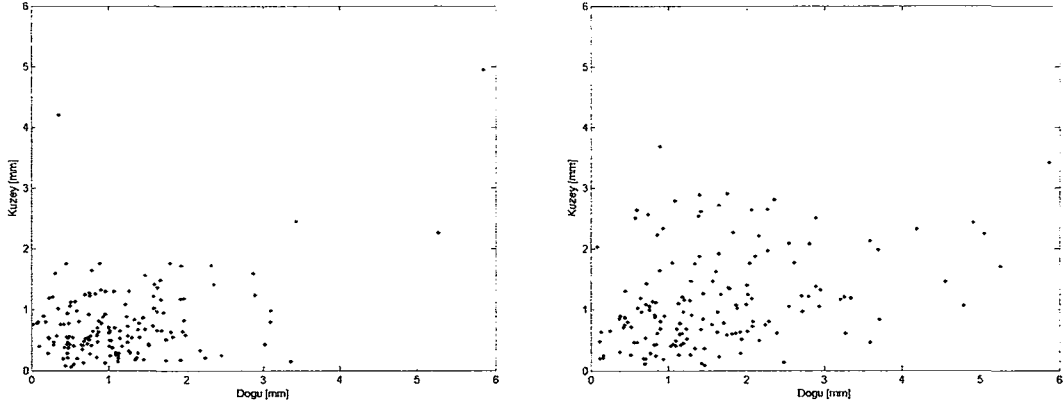


Şekil 6.25 ISTA NS bileşeni zaman serisi ve lineer regresyona yıllık ve yarı-yıllık genliklerin dahil edilmesiyle bulunan çözüm



Şekil 6.26 ISTA EW bileşeni zaman serisi ve lineer regresyona yıllık ve yarı-yıllık genliklerin dahil edilmesiyle bulunan çözüm

görülebileceği gibi oldukça küçüktür. Ancak bu, ISTA istasyonuna özgü bir durumdur ve diğer istasyonlarda bulunan genlik değerleri Şekil 6.27’de gösterilmiştir. Görülebileceği



Şekil 6.27 Yarı-yıllık (solda) ve yıllık genlik bileşenleri

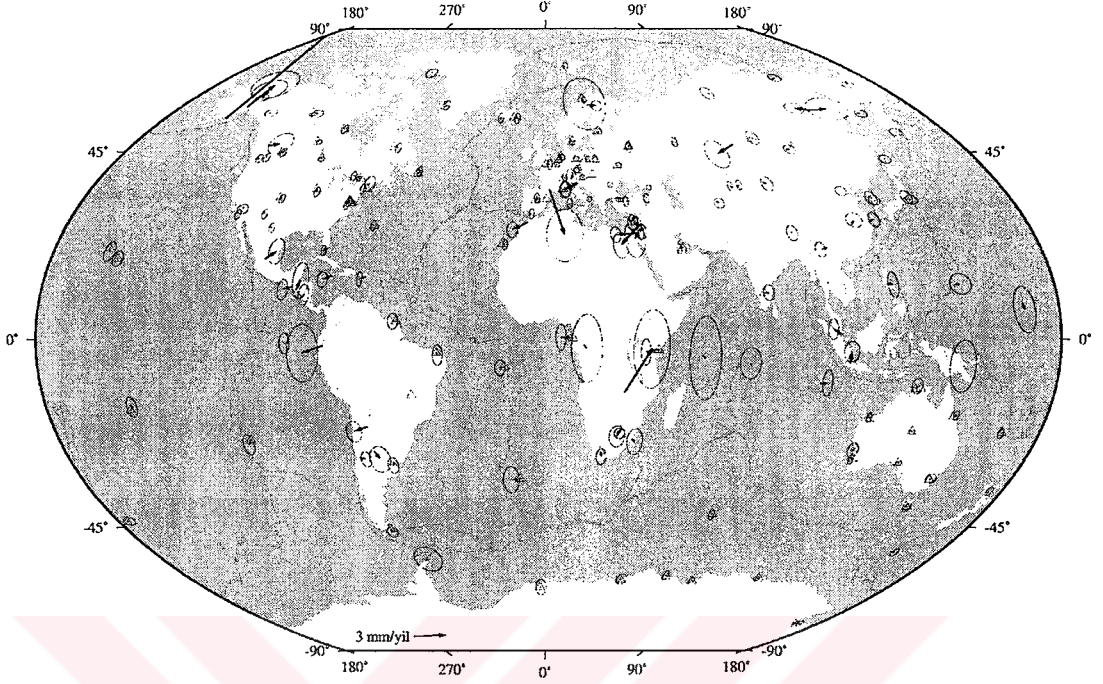
üzere yarı-yıllık bileşenlerin genlikleri 0.2 ile 2 mm arasında değişirken yıllık bileşenlerde genlikler 3 mm’e kadar ulaşabilmektedir. Bu periyodik hareketler modellenemeyen yerel etkiler dolayısıyla ortaya çıkmaktadır. Genliklerin (6.15)’deki gibi fonksiyonel modele dahile edilmesi ile bulunan hızların lineer regresyon çözümü ile bulunan hızlarla karşılaştırması Şekil 6.28’de verilmiştir. Farkların çok az noktada anlamlılığı söz konusudur. Bu çalışmada 3 yıla ait veriler kullanılarak hız bileşenleri kestirildiğinden farklar anlamlı olarak elde edilmemiştir. Ancak 2.5 yıldan daha az zaman serileri ile hesaplamalarda yarı-yıllık ve yıllık harmoniklerin de modellenmesi hızları etkileyeceğinden mutlaka modelleme yapmak gerekir (Blewitt ve Lavallée, 2002).

Şekil 6.24’deki güç spektrumundan da görülebileceği gibi serinin gücü frekansın logaritmik değeri ile lineer olarak azalmaktadır. Bu değişimin

$$\alpha = \frac{P_f}{10 \log_{10} f} \quad (6.16)$$

ile bulunacak eğimi, güç spektrumunun spektral indeksi olarak isimlendirilir. α , aldığı değerlere göre değişik şekillerde yorumlanır. Örneğin Şekil 6.24’de verilen spektrumun frekans (periyot) eksenine paralel olan yüksek frekanslı kesiminde olduğu gibi $\alpha = 0$ ise serinin normal dağılıma sahip olduğundan bahsedilir. Buna

beyaz gürültü de denir. $-1 < \alpha < 1$ durumunda fraktal beyaz gürültü, $\alpha = 1$ ise flicker gürültü olarak isimlendirilir (Zhang ve diğ., 1997).



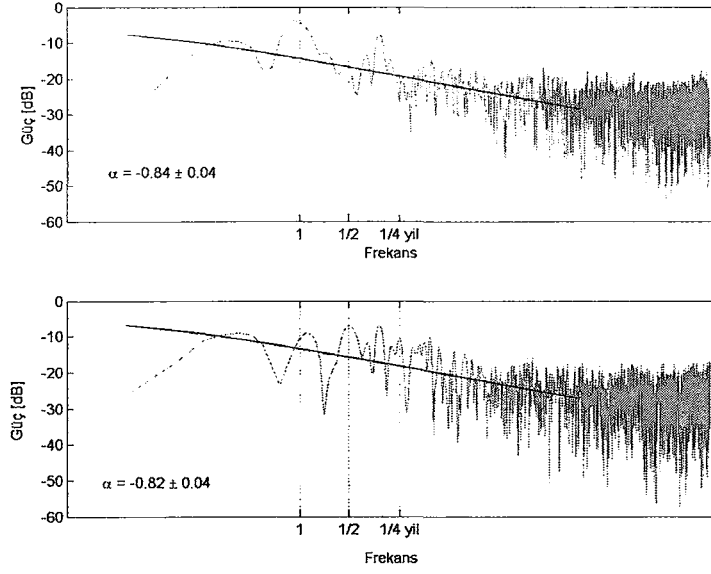
Şekil 6.28 Lineer ve genişletilmiş regresyon ile bulunan hızların karşılaştırılması

Spektral indeks, zaman serilerinden gerçekçi hız doğruluklarının bulunmasında önemli bir rol oynamaktadır. Spektral indeksi anlamlı olan zaman serilerinde serinin stokastik modeli

$$\mathbf{Q}_{II} = a^2 \mathbf{I} + b_a^2 \mathbf{J}_a \quad (6.17)$$

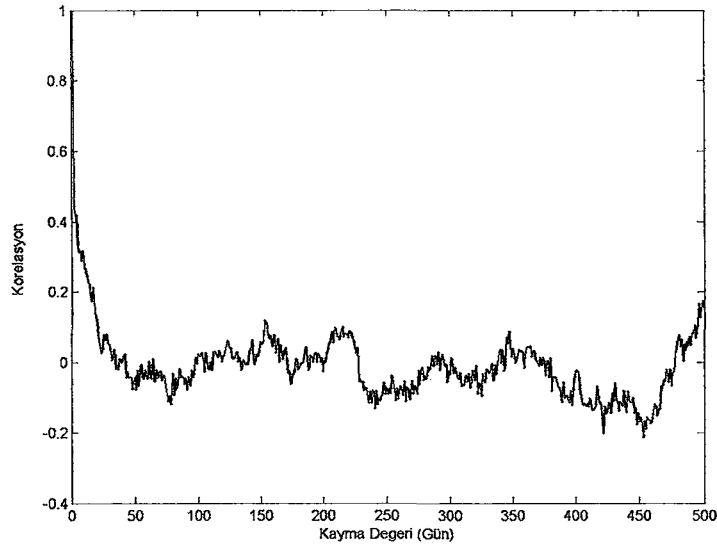
biçiminde verilir. (6.17)'de geçen a ve b sırasıyla beyaz ve flicker gürültü miktarlarını belirleyen faktörleri, $\mathbf{I}$ birim matrisi ve $\mathbf{J}_a$ ise α spektral indeks kullanılarak bulunacak kofaktörler matrisini göstermektedir. $\mathbf{J}_a$ elemanları arasındaki korelasyon α gözönüne alınmak suretiyle modellenir. a ve b , Maksimum Olabilirlik Kestirimi (MLE) kullanılarak bulunabilir (Mao ve diğ., 1999; Nikolaidis, 2002; Williams, 2003; Zhang ve diğ., 1997). Bu çalışmada yukarıda kısaca açıklanan ve bugüne kadar noktaların hız alanının gerçekçi doğruluklarının bulunmasında birçok araştırmacı tarafından kullanılagelen yöntem yerine aşağıda açıklanan pratik bir yöntem kullanılacaktır.

Şekil 6.29'da zaman serilerinin (6.15) eşitliği ile modellenmesi ertesinde düzeltme değerleri ile hesaplanan spektrum ve spektrumun yatay seyretmeye başladığı noktaya

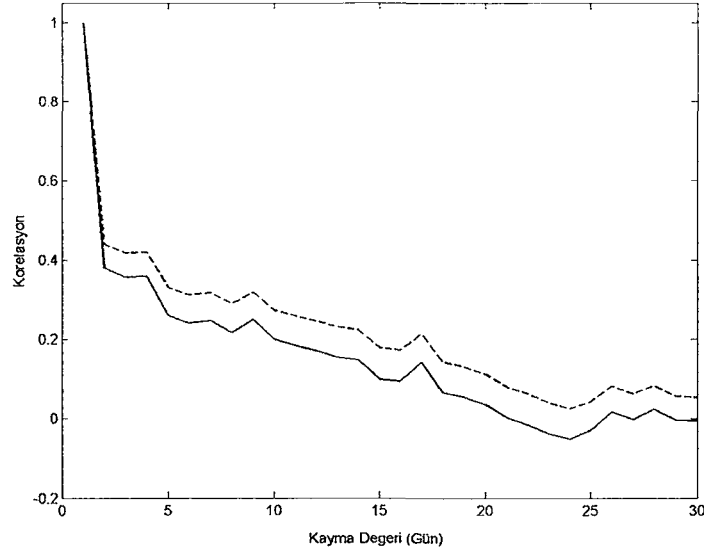


Şekil 6.29 TRAB zaman serilerinin 1 gün örnekleme aralıklı lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu

kadar sınırlama yapılarak bu serinin eğimi veya spektral indeksi ± 0.04 doğrulukla elde edilmiştir. α değerinin sıfırdan farklı ve anlamlı çıkması ya da spektrumda frekansın logaritmik değeri büyüdükçe lineer azalan bir güç spektrumu, tekrarlamalı sinyalleri göstermektedir. Bu durumun neden ortaya çıktığı sorusuna yanıt verebilmek için istasyonun düzeltme değerlerinin otokorelasyonuna bakmak yerinde olacaktır. Şekil 6.30'da TRAB istasyonunun EW bileşeninin düzeltme değerlerinin



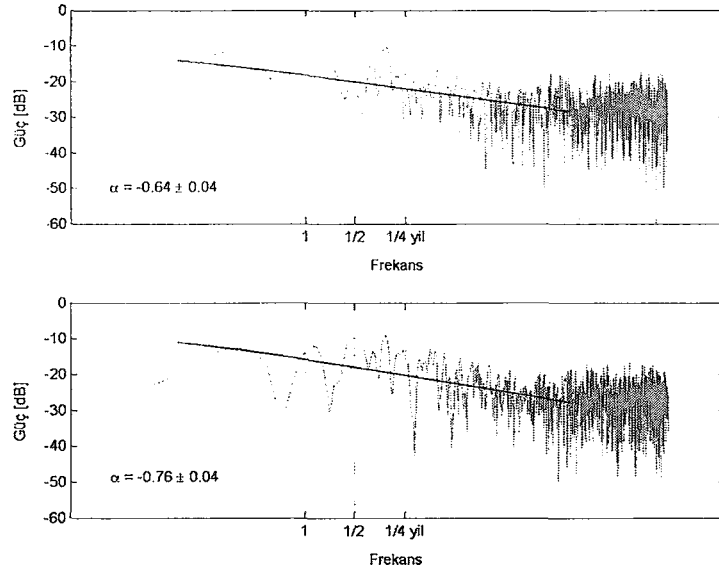
Şekil 6.30 TRAB EW bileşeni zaman serisinin maksimum korelasyon değerine göre normlandırılmış otokorelasyonu



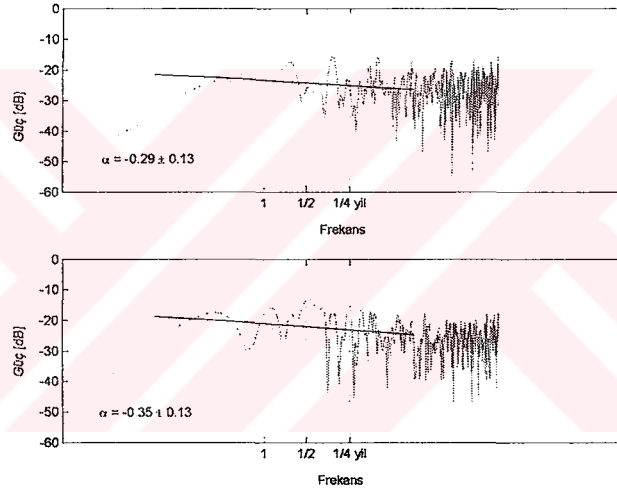
Şekil 6.31 Şekil 6.30'un aynısı ancak ilk 30 günlük değişim

(5.17) eşitliği ile hesaplanan otokorelasyonu görülmektedir. 500 gün için hesaplanan otokorelasyon değerlerinin büyük bir kısmı ± 0.2 değerleri arasında dalgalanmaktadır. Otokorelasyonun ilk 30 gündeki asimptotik azalışını daha açık olarak görmek için Şekil 6.31'den yararlanılabilir. Şekilde koyu çizgi ile gösterilen, lineer regresyonun, yıllık ve yarı-yıllık değişimleri içine alacak şekilde genişletildiği durumu, kesikli çizgilerle gösterilen ise yalnızca lineer regresyon ile trend eliminasyonu sonucu elde edilen düzeltme değerleriyle bulunan otokorelasyonu göstermektedir. Yıllık ve yarı-yıllık bileşenlerin dahil edildiği bir çözümün otokorelasyonu etkilediği açıktır. Şekilden 5-6 günden itibaren korelasyonun, pratik olarak sıfır kabul edilebileceği 0.2-0.3 değerlerine yakınsadığı görülebilir.

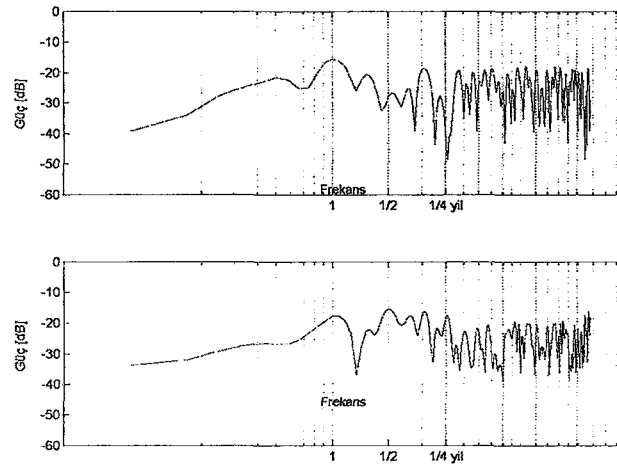
Şekil 6.29'da verilen örnekte hesaplandığı gibi örnekleme aralığının 1 değil de 2 gün olarak seçilmesi halinde güç spektrumu nasıl değişecektir? TRAB zaman serisinden her iki günde bir ölçü alınarak serinin yarısı ile trend kestirilmesi sonucu düzeltmeler elde edilmiştir. Şekil 6.32'den bu düzeltmelerle hesaplanan spektral indeks NS bileşeninde -0.82 'den -0.64 'e, EW bileşeninde ise -0.84 'den -0.76 'ya anlamlı bir şekilde düşmüştür. Örnekleme aralığının 7 gün seçilmesi halindeki güç spektrumu Şekil 6.33'de görüleceği gibi daha düz bir seyir izlemektedir. 14 gün örnekleme aralığı ile güç spektrumunda spektral indeksin pratik olarak sıfır olduğu ise Şekil 6.34'de açık bir şekilde görülmektedir. Şimdiye kadar verilen güç spektrumları,



Şekil 6.32 TRAB zaman serilerinin 2 gün örnekleme aralıklı lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu

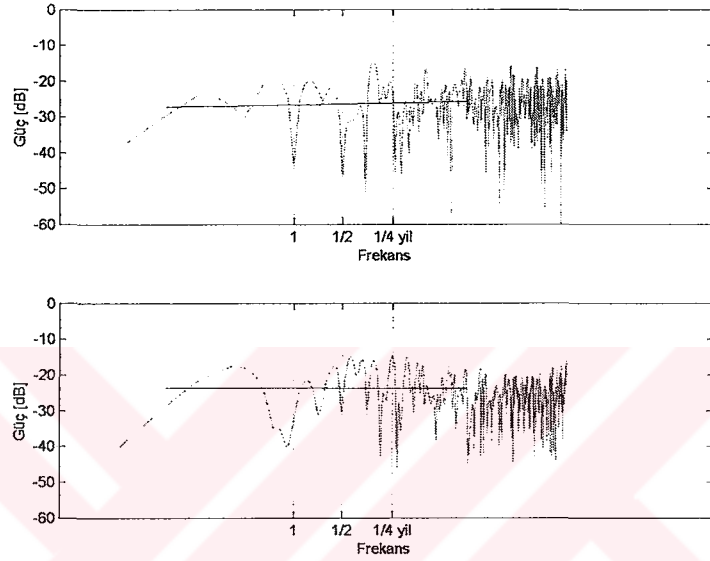


Şekil 6.33 TRAB zaman serilerinin 7 gün örnekleme aralıklı lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu



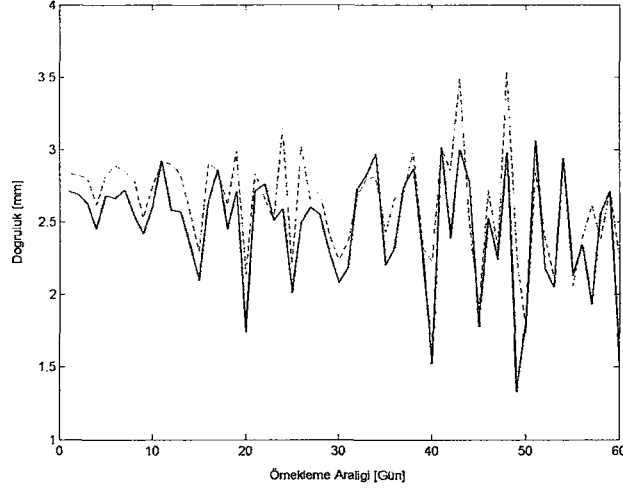
Şekil 6.34 TRAB zaman serilerinin 14 gün örnekleme aralıklı lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu

lineer regresyon ile trend elimine edildikten sonra bulunan düzeltme değerleriyle hesaplanmıştır. Şekil 6.31’de lineer regresyonla bulunan düzeltmelerinin otokorelasyonunun gerçekten yaklaşık 10 gün sonra kabul edilebilir seviyeye geldiği görülmektedir. Aynı şekilde koyu çizgi ile gösterilen genişletilmiş lineer regresyon ile ise aynı etkinin 5 ile 10 gün arasında görülmesi gerekir ki gerçekten Şekil 6.35, 7 gün örnekleme aralığında artık düz bir spektrum elde edildiğini ortaya koymaktadır.



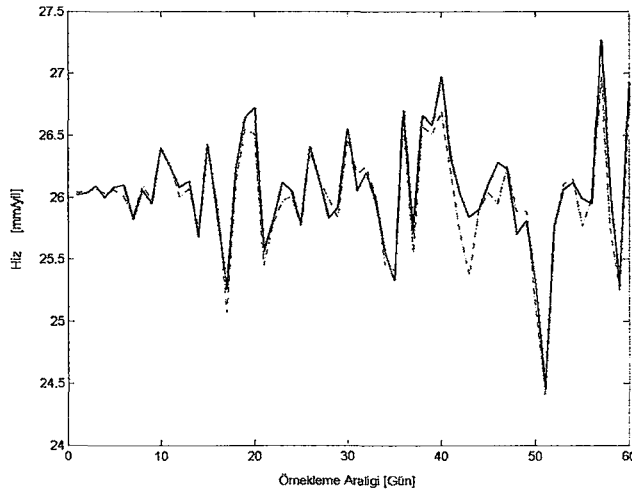
Şekil 6.35 TRAB zaman serilerinin 7 gün örnekleme aralıklı yıllık ve yarı-yıllık genlik değerlerinin de kestirildiği lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu

Bu etkinin seçilen istasyona özgü olup olmadığının testi için bir başka istasyon olan WTZR seçilmiştir. WTZR istasyonunun EW bileşeninin düzeltme zaman serisinin otokorelasyonu Şekil A.5’de verilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere korelasyonun 0.3 değerine inışı bu kez TRAB örneğinde olduğu gibi 7 değil 14. günden itibaren olmaktadır. Şekil A.6, A.7 ve A.8’de WTZR istasyonunun 1, 7 ve 14 gün örnekleme aralıklarında (6.15)’deki genişletilmiş regresyonla hesaplanan düzeltmelerinin spektrumu görülmektedir. EW bileşeninde olduğu gibi 14. günden itibaren düzleşen spektrumun istasyona değil serinin bu istasyondaki bileşenine bağlı olduğu, spektrumunun 7. günden itibaren düzleşmeye başladığı Şekil A.7’deki NS bileşeninden görülebilmektedir. Zira WTZR NS bileşeni için 7 gün örnekleme aralığı korelasyonun pratik anlamda olmadığını kabul edildiği sınırdır.



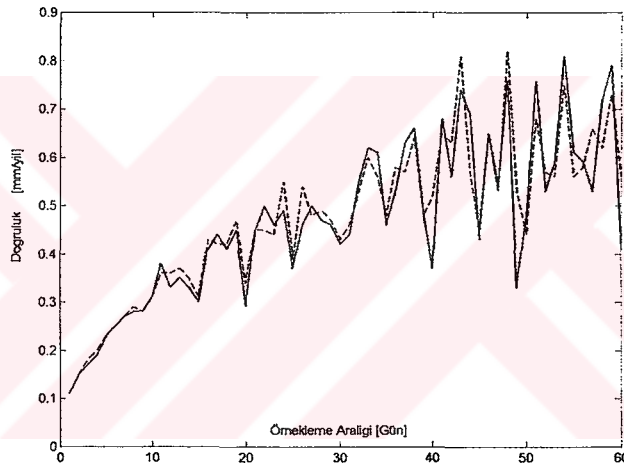
Şekil 6.36 TRAB EW bileşeni zaman serisi doğruluğunun farklı örnekleme aralıkları için değişimi

Örnekleme aralığının değişiminin kestirimi yapılacak soncul doğruluk ve hız bileşenine etkisi nasıl olacaktır? Bunları göstermek üzere TRAB istasyonunun EW bileşeni zaman serisi, 1'den 60'a kadar değişen örnekleme aralıklarıyla değerlendirilmiş ve elde edilen doğruluk Şekil 6.36'da sunulmuştur. Şekilde yıllık ve yarı-yıllık etkiler modele dahil edilmeden yapılan değerlendirmeler kesikli çizgi ile gösterilmiştir. Bu etki göz önüne alınarak ve alınmadan bulunan değişimler arasında çok büyük farklılıklar görülmemektedir. Soncul doğruluk 10 güne kadar örnekleme aralığı için çok küçük değişimler gösterirken 10-30 gün örnekleme aralıklarında ilk kısma nazaran daha dalgalı bir değişim sergilemektedir. Nokta hızının değişik örnekleme aralıkları için gösterildiği Şekil 6.37'den ise nokta hızının çok büyük sapmalar göz ardı edilirse 25.5 ile 26.5 mm arasında dalgalandığı görülmektedir.

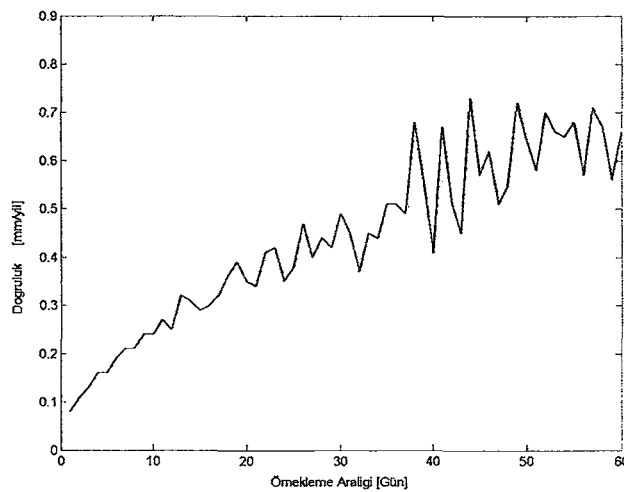


Şekil 6.37 TRAB EW bileşeni hızının farklı örnekleme aralıkları için değişimi

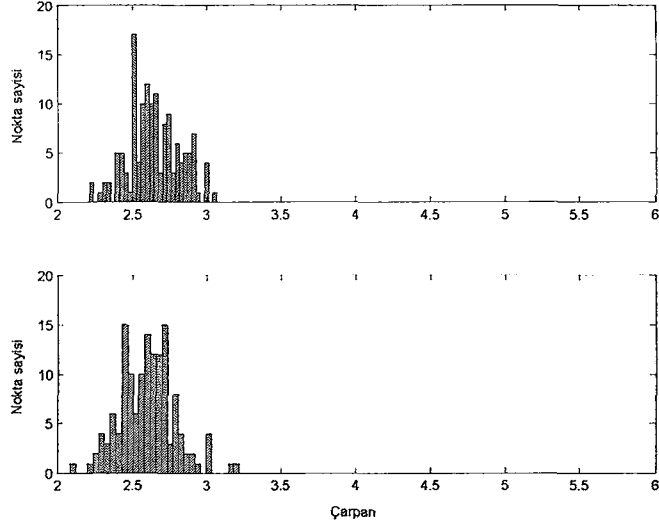
Şekil 6.38 yine 1 ile 60 arasında örnekleme aralıkları için hız doğruluklarının değişimini göstermektedir. Şekil, 10 gün örnekleme aralığına kadar hız doğruluğunun logaritmik bir biçimde azaldığını göstermektedir. Buradaki düz değişime nazaran daha dalgalı bir değişim, 10 ile 30 gün örnekleme aralıklarıyla elde edilen değerlerde görülmektedir. Yukarıda serilerin otokorelasyonu ve spektral analizi ışığında yapılan çıkarımlar sonucunda bu bileşenin, 1 gün örnekleme aralığı ile elde edilen düzeltmelerden hesaplanan doğruluğu yaklaşık 2.5 ile 3 kat daha optimistik bir kestirimdir denilebilir. Bu sonucun istasyona özgü bir durum olup olmadığını anlamak için hesaplamalar bir kez de WTZR istasyonu için yapılmış ve aynı sonuçlara ulaşılmıştır. Aynı şekilde 1 gün örnekleme aralığı ile WTZR EW bileşeni hız doğruluğunun da 4 kat civarında daha optimistik olarak elde edildiği Şekil 6.39'da açık olarak görülmektedir.



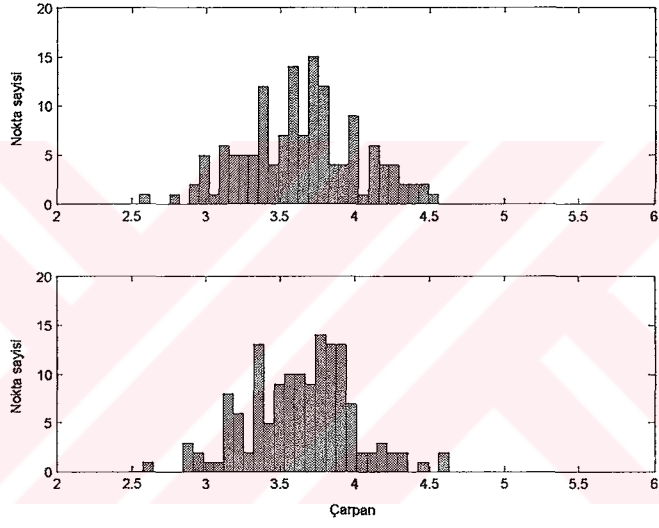
Şekil 6.38 TRAB EW bileşeni hız doğruluğunun farklı örnekleme aralıkları için değişimi



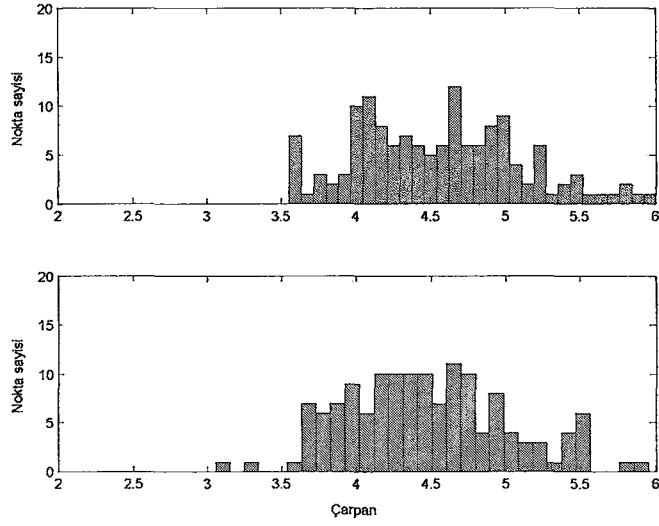
Şekil 6.39 WTZR EW bileşeni hız doğruluğunun farklı örnekleme aralıkları için değişimi



Şekil 6.40 Örnekleme aralığı 7 gün alınarak bulunan hız doğruluklarının 1 gün örnekleme aralığı ile bulunan doğruluklara oranı



Şekil 6.41 Örnekleme aralığı 14 gün alınarak bulunan hız doğruluklarının 1 gün örnekleme aralığı ile bulunan doğruluklara oranı

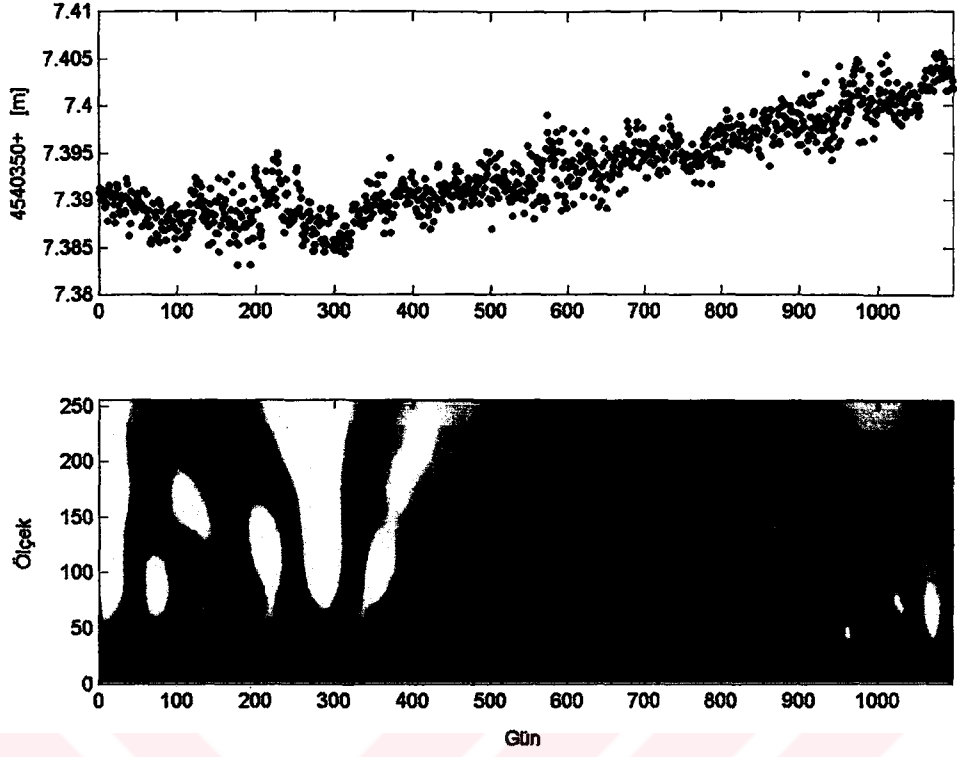


Şekil 6.42 Örnekleme aralığı 21 gün alınarak bulunan hız doğruluklarının 1 gün örnekleme aralığı ile bulunan doğruluklara oranı

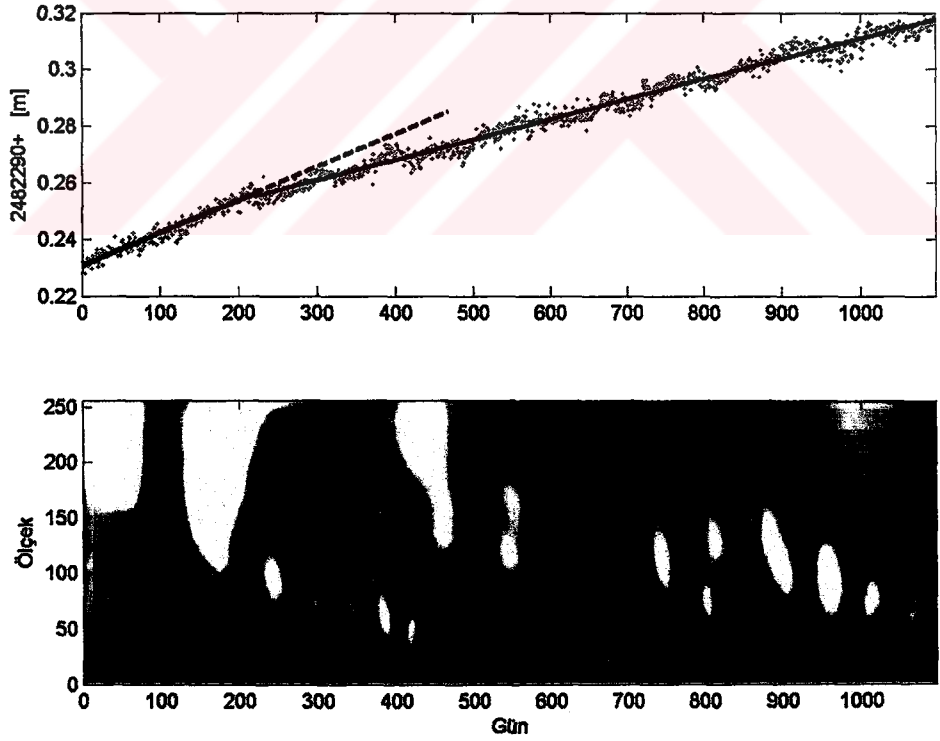
Bir önceki bölümde açıklanan sıfır çözümü ile elde edilen 140'a yakın istasyonun zaman serisi ile sembolik olarak seçilen 7, 14 ve 21 gün örnekleme aralığı alınarak elde edilen hız doğruluklarının 1 gün örnekleme aralığı ile elde edilen doğruluklara oranı sırasıyla Şekil 6.40, 6.41 ve 6.42'de verilmiştir. Verilen şekillerden genel olarak tüm noktalar için hız doğruluğunun düzeltmelerin spektrumu hesaba katılarak 2 ile 6 kat arasında değişen oranlarda ölçeklendirilerek verilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Aksi halde 1 gün örnekleme aralığı ile hesaplanan hız doğrulukları, çözümler arasındaki yüksek korelasyon nedeniyle doğru bir kestirim olmayacaktır.

6.5 Zaman-Frekans Uzayında Analiz

Bölüm 6.3 ve 6.4'de elde edilen zaman serilerinin sırasıyla zaman ve frekans uzaylarında analiz edilmiş ve serideki lineer ve periyodik değişimler incelenmiştir. Burada ise Bölüm 5.2'de verilen bilgiler ışığında seçilen örnek serilerdeki değişim farklı bir yöntemle incelenecektir. Şimdiye kadar zaman serilerinin güç spektrumunun spektral indeksi anlamına gelen eğimi veya hız vektörlerinin mutlak değerleri ele alınmış ve istasyonların lineer bir hareket gösterdikleri kabul edilmiştir. Ancak istasyonlar çeşitli nedenlerle lineer bir hız ile hareket etmeyebilirler. Örnek olarak TUBI istasyonunun NS bileşenine ait 3 yıllık zaman serisi ele alınsın. Şekil 6.43'de verilen seri, başlangıcından 300-330 günlerine doğru olan kısım ile serinin geri kalanı olmak üzere ikiye ayrılabilir. 300. gün civarında kadar serinin diğer kesimlerine benzemeyen, anlamlı bir trend gözlenmektedir. Uyuşumsuzluk görünümü veren, aslında yapılan analiz sonucunda uyumlu olarak ortaya çıkan o günlere ait bu trendi ikinci kesimdeki trendden ayırmak ve istasyona özgü olası hareketi ortaya çıkarmak gerekmektedir. Bunu yaparken serinin zaman ekseninde hangi nokta veya nokta kümesinden itibaren değişimin ortaya çıktığının da aynı zamanda belirlenmesi gerekir. Değişimin zamansal olarak nerede olduğunu tespit etmek üzere wavelet dönüşümü uygulanabilir. TUBI istasyonunun NS bileşeninin 5.Bölümde tanıtılan Daubechies4 “db4” wavelet dönüşümü yine Şekil 6.43a'da görülmektedir. Wavelet dönüşümü yapabilmek için zaman serisi, veri kesikliğinin olduğu veya kaba veya uyumsuz ölçü nedeniyle veri kümesinden uzaklaştırılan noktalar için enterpolasyonla eşit aralıklı hale getirilmiştir. Şekilde koyu renkler minimumu açık renkler de maksimumu göstermektedir. Gösterimin çeşitli konumlarında eş yükseklik eğrisi gibi konsentrik yapıların dağılımı serinin



a) TUBI NS bileşeni



b) TUBI EW bileşeni

Şekil 6.43 TUBI istasyonu koordinat zaman serisi ve bunların 'db4' wavelet dönüşümü

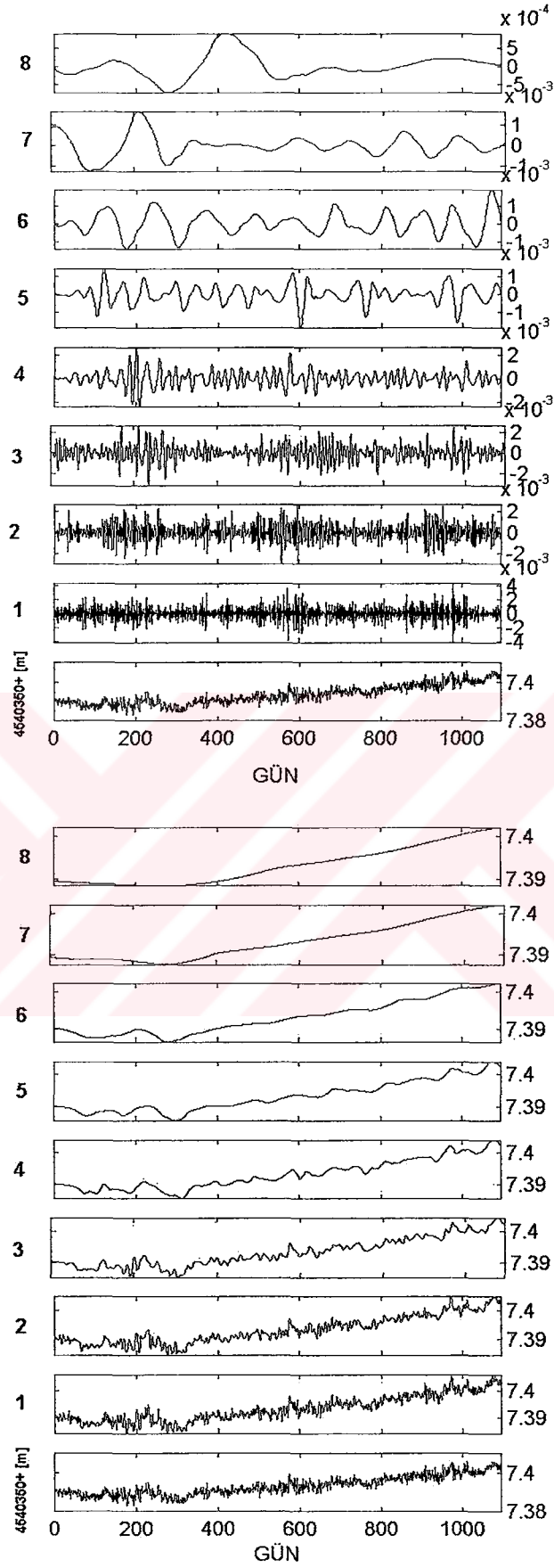
periyodik bileşenleri hakkında bilgi vermektedir. Ancak burada periyodik özellikleri incelemekten çok serideki ani değişimler üzerine yoğunlaşılacaktır. Gösterimde 300. gün civarındaki değişim oldukça dikkate değerdir. Serinin yön değiştirmesi 300. gündeki wavelet katsayılarında yansımaları bulmuştur. Şekilden ayrıca serinin yön değiştirmesinin ise 90 gün içinde olduğu da farkedilmektedir.

TUBI NS bileşenindeki değişime ek olarak EW bileşeninde de benzer bir değişim gözlenebilmektedir. Şekil 6.43b, EW bileşeninin zaman serisi ve sürekli wavelet dönüşümü kullanılarak hesaplanan katsayılarını göstermektedir. Şekilden EW bileşenindeki zaman serisinde 200. gün civarında bir maksimum görmek mümkündür. Ancak bu kez NS bileşenindeki deprem sonrası hareket değişiminde olduğu gibi serinin yön değiştirmesi söz konusu olmayıp sadece hız büyüklüğü değişmektedir.

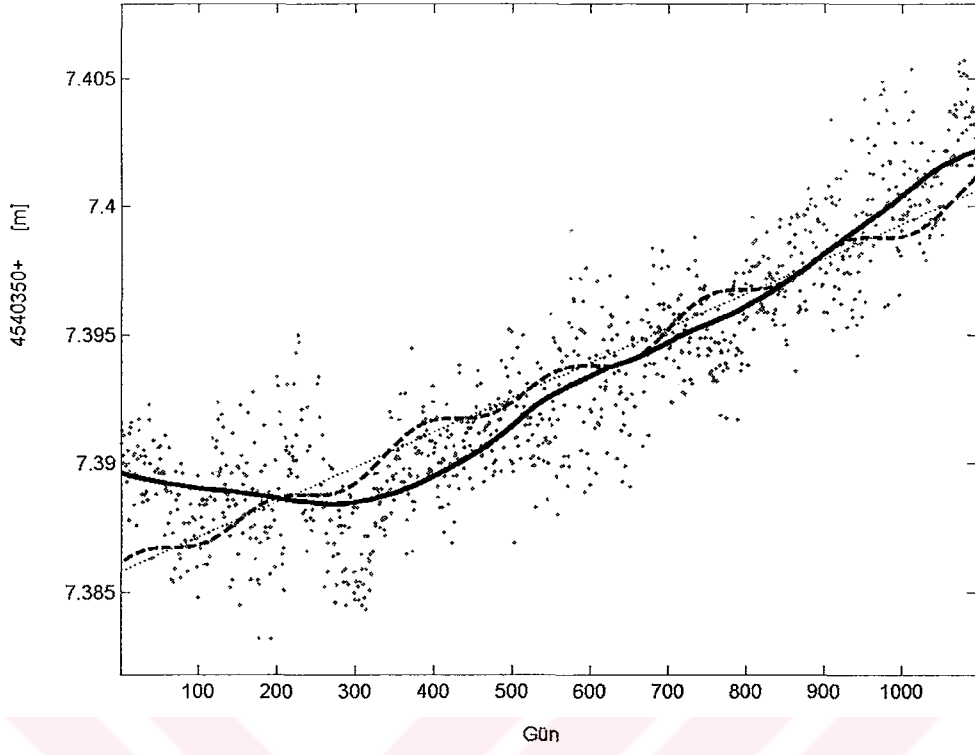
Sürekli wavelet dönüşümü, yukarıdaki örneklerde gösterildiği gibi görsel olarak değişimleri ortaya çıkarması bakımından önemlidir. Verilen örneklerde öncelikle serinin trendi elimine edilmiş ve bulunan düzeltme değerleri ile sürekli wavelet dönüşümü uygulanmıştır. Ancak seriye bir trend uydurmak kendi içinde bir paradokstur. Çünkü zamana bağlı değişimlerin incelenmesi istenildiğinde fonksiyonun gidişinin modellenmesi, fonksiyondaki değişimleri ortaya çıkarmak yerine bastırabilmektedir. Şekil 6.43a'ya dikkatli bakıldığında serideki noktaların %75'inin serideki genel trendi yani yukarıya doğru gidişi temsil ettiği görülmektedir. Bunun sonucunda her iki serinin genel gidişine tezat dilimlerinde, yani her iki dilimin başında ve sonunda maksimumlar gözlenmiştir. İkinci bir problem sürekli wavelet dönüşümü ile bir sinyalin minimum örnekleme zamanı kadar değerinden sinyalin boyut değerine kadar her ölçekte zamana karşı değişimi görülebilmektedir. Ancak bütün ölçeklerde inceleme yapmak hem hesaplama yükünü artırmakta ve hem de yorumlamayı güçleştirmektedir. Bir diğer dezavantaj da sürekli wavelet ile analizin Bölüm 5.2.2'de ele alınan ve waveletin en önemli özelliklerinden biri olan sinyalin çeşitli ölçeklerde süzgeçlenmesine olanak vermemesidir. Sürekli wavelet analizine daha çok seküler değişimin olmadığı periyodik değişimlerin incelenmesinde başvurulmaktadır (Schmidt ve Schuh, 1999; Schmidt, 2001). Bu bakımdan verilen tek boyutlu sinyalin, sinyale genel bakışı zorlaştıran bütün ölçeklerde analizi yerine diydik (2'nin katları şeklinde) analizi problemi görsellik boyutundan çıkaracaktır.

Sürekli wavelet dönüşümü yerine ayrık wavelet dönüşümü kullanarak Bölüm 5.2.2’de gösterildiği gibi serinin çeşitli ölçeklerde incelemesi yapılabilir. Burada ayrık wavelet dönüşümünün trend hesap edilerek incelemesi yapılacak sürekli wavelet dönüşümüne nazaran üstünlüğü ortaya çıkmaktadır. Şekil 6.44’de TUBI istasyonuna ait NS bileşeni zaman serisinin 1’den 8’e kadar ölçeklerde yine Daubechies ‘db4’ wavelet kullanılarak (5.33) eşitliği ile verilen detayları ve bunlara karşılık (5.37) eşitliği ile verilen serinin gidişi görülmektedir. Serinin 1. ölçeğinde detay değişimleri diğer bileşenlere nazaran inişli çıkışlıdır. Ancak ortalama bir eksen etrafında sıralanmışlardır. (5.27) eşitliği gereği her bir ölçekteki detay değerlerinin toplamı sıfırdır. 1. ölçek detayları serideki günlük değişimleri göstermektedir. Bu değişimler bazı istasyonlarda anten ve alıcı değiştirilmesi veya anten yüksekliğinin istasyon log dosyasına yanlış girilmesi gibi durumlarda ortaya çıkmaktadır. 1. ölçek için serinin yaklaşık değerinin seriyle hemen hemen örtüştüğü yine şekilden görülmektedir. Ölçek büyüdükçe detay ve fonksiyon yaklaşım vektörleri süzgeçlenmiş gibi bir yapı göstermektedirler. Ölçeğin büyümesi detaylarda periyodik bir oluşumu da ortaya çıkarmaktadır. Örnek olarak 6 ve 7. ölçekteki periyodik değişim göze çarpmaktadır. 7. ölçekteki dalga tepeleri sayıldığında 7’dir ve bu değer bir eksiği 3 yıldaki 6 aylık değişimleri göstermektedir. Aynı şekilde 8. ölçekte de serinin yıllık periyotta değişimi biraz belirsiz bir şekilde olmakla birlikte yine de izlenebilmektedir. Örnek olarak 7. ve 8. ölçeklerde orta eksenden periyodik sapmalar serinin yarı-yıllık ve yıllık genliklerini göstermektedirler.

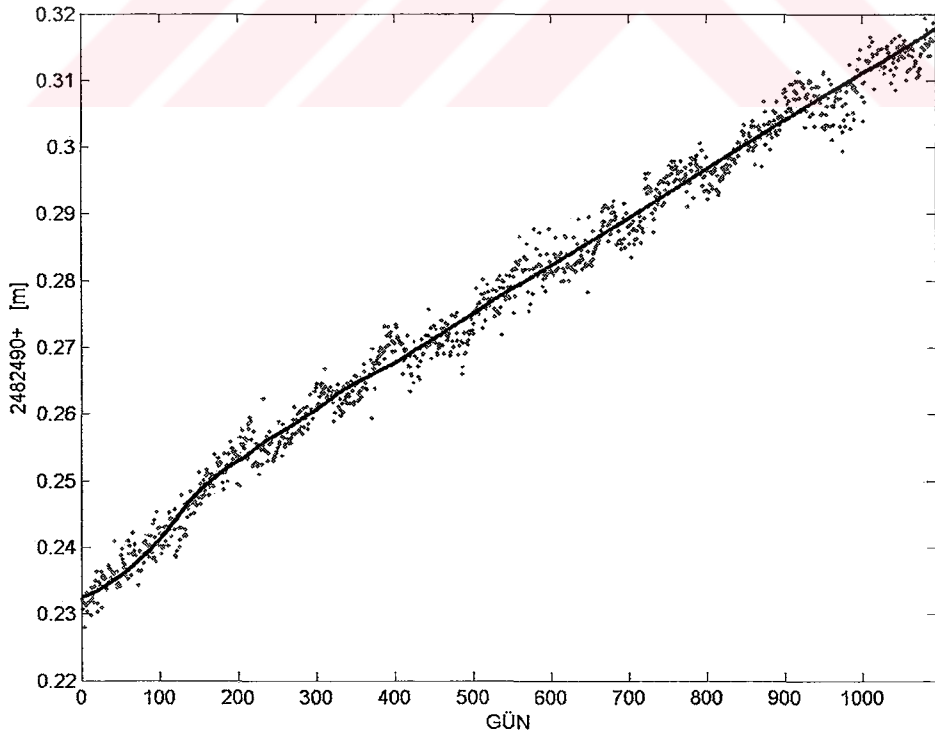
Wavelet analizinde ölçek büyüdükçe fonksiyon yaklaşımı daha düzleşmekte ani iniş-çıkışlar azalmakta ve seriye uygun fonksiyon da daha geneli göstermektedir. Örnek olarak 5. ölçeğe kadar fonksiyonun gidişi daha dalgalı iken bu ölçekten sonra daha düzleşmiş bir durum ortaya çıkmaktadır. TUBI istasyonunun NS bileşenine ait zaman serisinin gerek lineer regresyon gerekse de lineer regresyona ek olarak yıllık ve altı aylık değişimlerin de birlikte modellendiği çözümde (6.15) ile verilen model testi uygulanmış ve sıfır hipotezi reddedilmiştir. Bunun nedeni Şekil 6.45’den de görüleceği üzere serinin yaklaşık olarak 300. günden itibaren eğim değerinin sıfıra çok yakın bir değerden pozitif bir değer almaya başlamasıdır. Wavelet’in üstünlüklerinden bir diğeri işte bu noktada ortaya çıkmaktadır. Şekil 6.45’de nokta nokta gösterilen lineer regresyon çözümüdür ve bunun sonucunda hız +4.9 mm/yıl olarak bulunmuştur. Aynı şekil üzerinde kesikli ve kalın çizgilerle gösterilen lineer



Şekil 6.44 TUBI NS bileşeni zaman serisinin 'db4' wavelet ile elde edilen detay (üstte) ve serinin değişik ölçeklerde süzgeçlenmiş durumu (üstte)



Şekil 6.45 TUBI NS bileşeni zaman serisinin değişik yöntemlerle süzgeçlenmiş durumu

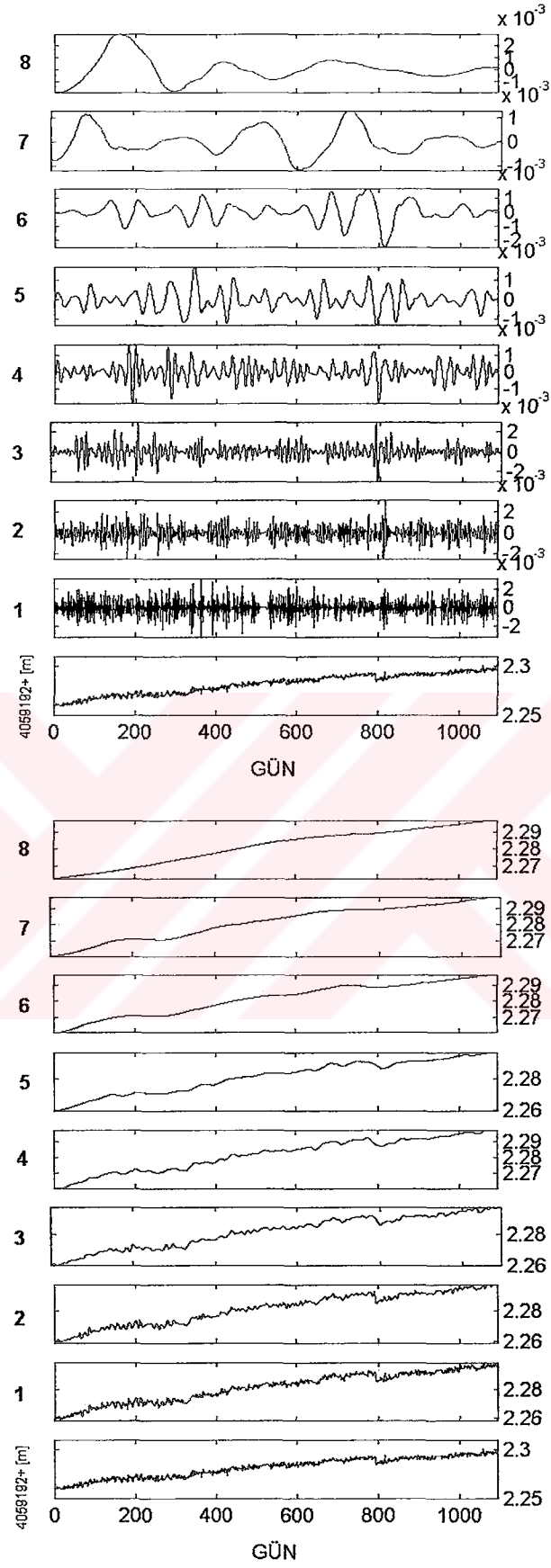


Şekil 6.46 TUBI EW bileşeni zaman serisinin db4 ile süzgeçlenmiş durumu

regresyon modeline ek olarak yıllık ve yarı-yıllık periyodik değişimlerin de modellendiği çözümü göstermektedir ve bunun sonucunda hız lineer regresyon modeli ile elde edilenden farksızdır ve +5.0 mm/yıldır. Zaman serisinin trendini en iyi ifade eden, kalın çizgi ile gösterilen wavelet dönüşümü sonucu bulunan eğridir. Bu eğrinin 1-300 gün ve 301-1096 gün arası olmak üzere iki kısımda ayrı ayrı hızları sırasıyla -1.4 ve +5.9 mm/yıl'dır. Her iki hızın karesel ortalama hatası bir önceki bölümde ele alınan zamansal korelasyon etkisi göz önüne alınarak ölçeklendikten sonra ± 0.3 mm/yıl olarak bulunmuştur. Dolayısıyla hızların %5 yanılma olasılığı ile anlamlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Serideki 2000 yılının 300. gününe kadarki bu değişim 17 Ağustos depremi ertesinde post sismik hareket nedeniyle ortaya çıkmıştır şeklinde yorumlanabilir (Ergintav ve diğ., 2002; Lenk ve diğ., 2003; Doğan ve diğ., 2003). Benzer şekilde TUBI istasyonunun EW bileşeninde daha önce bahsedilen, hız bileşeninin mutlak değerinin değiştiği Şekil 6.46'da 7. ölçekte açık bir şekilde görülmektedir. 150 ile 200. günler arasında bir konumdan itibaren süzgeçlenmiş seri daha düz bir gidiş sergilemektedir. Her iki örnekte de görüldüğü gibi robust kestirim ile, serinin genel gidişine aykırı 1-300. gün arası nokta topluluğunu ortaya çıkarılamamıştır. Burada en küçük kareler yönteminin kaba hatalı veya uyuşumsuz ölçüleri diğer gözlemlere yaydığı gibi bir benzetme yaparak bu şekilde anlamlı olan ve serinin genel gidişine tezat bir gidiş gösteren noktalar kümesinin çok olması nedeniyle (örneğin NS bileşinde 300 kadar) robust kestirim başarılı olamamıştır denebilir.

Model testini geçemeyen bir başka seriye örnek olarak SFER NS bileşeni zaman serisi incelenebilir. Şekil 6.47'de artan ölçekte detay ve yaklaşık değerleri verilen seri wavelet analizi ile incelendiğinde 800. gün civarındaki bölgede sıçrama daha 3. ölçekten itibaren hemen ortaya çıkmaktadır. Bu ani değişim artan daha yüksek ölçeklerde de gözlenmektedir ve örnek olarak 6. ölçekte detay serisinin yapısını oldukça etkilemiştir. Kumar ve diğ. (2002) yaptıkları çalışmada bu ani değişimleri kayan ortalama otoregresyon ile belirlemişlerdir. Her ne kadar çalışmalarında wavelet analizini kullanmışlarsa da bunu yalnızca seküler ve periyodik değişimleri bulmak için kullanmışlardır. Yüksek frekanslı değişimler yine wavelet analizi ile yukarıdaki örnekte verildiği gibi rahatlıkla ortaya çıkarılabilir.

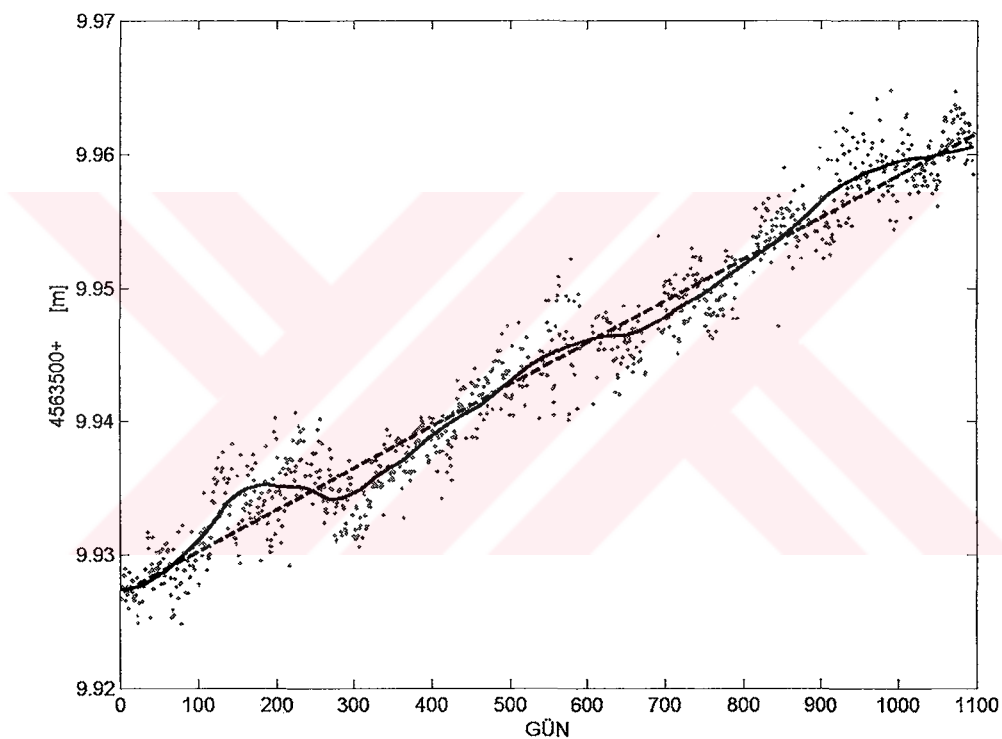
Şimdiye kadar verilen örneklerden TUBI ve SFER NS bileşenleri, model testini geçememişlerdir. Model testini geçen TRAB NS serisinin wavelet dönüşümü ile



Şekil 6.47 Sfer NS bileşeni zaman serisinin 'db4' wavelet ile elde edilen detay (üstte) ve serinin değişik ölçeklerde süzgeçlenmiş durumu (üstte)

incelemesi yapılarak Şekil 6.48’de verilmiştir. 7 ölçeğinde ISTA ve TUBİ’ye benzer olarak 150- ile 300 günleri arasında 150 güne yakın bir yatay seyir görülebilir. 17 Ağustos Gölçük deprem bölgesine uzaklığı nedeniyle eğrinin TUBİ NS bileşeni örneğinde olduğu gibi uzun süreli bir değişim söz konusu değildir.

Yukarıdaki örneklerden görüldüğü gibi EKK parametre kestirimi ile ortaya çıkarılamayan zaman serilerindeki ani değişimler ile serinin süzgeçlemesi wavelet analizi ile kolaylıkla yapılabilmektedir. Wavelet süzgeçlemesi ile model testinin kabul edildiği serilerde bir anlamda fonksiyonel modelin geçerli olamayabileceği gösterilmiştir.



Şekil 6.48 TRAB NS bileşeni zaman serisinin lineer regresyon ve wavelet ile bulunan 6. ölçekte süzgeçlenmiş durumlarının karşılaştırılması

7. SONUÇ

Gerek jeodinamik amaçlar doğrultusunda, gerekse koordinat sistemlerinin gerçekleştirilmesi çalışmalarında, ağ oluşturan yeryüzü noktalarına ilişkin hızların belirlenmesine esas olacak referans ağı büyük önem taşımaktadır. Ağa datum verecek noktaların yer seçiminden, ağın ölçme planına, baz çözümlerindeki stokastik modellemelerden, değerlendirme stratejilerini oluşturan değişik fonksiyonel modellere kadar, izlenen hesaplama yolları sonuçları önemli ölçüde etkilemektedir.

Bu çalışma içinde istasyon noktalarının koordinatlarının, datuma ve ağ geometrisine bağlı değişimleri incelenmiştir. Datum belirleyen noktaların olumsuz etkisi (3 çözümü) EW bileşeninde ortalama olarak 4 mm'yi (ISTA da max. 20 mm) aşmaktadır. Keza yalnızca nokta koordinatlarının bilinmeyen alındığı (5 çözümü) fonksiyonel modelin yine elverişli sonuçlar vermediği, ortalama farkların 3 mm'ye (ISTA da max. 15 mm) ulaştığı görülmektedir. Bu sonuçlara bakıldığında ağa datum veren noktaların ve fonksiyonel model seçiminin önemi görülmektedir.

Tablo 7.1'de, Anadolu bloğu ve çevresinde yer alan 4 noktada hız bileşenlerinin değişik çözümlerine ilişkin karşılaştırmalar verilmektedir. Tabloda uygulama ağının 1, 2, ...,5 ile numaraladıkları çözümlerinin sonuçlarının sıfır çözümü ile farkları yer almaktadır. Farkların hesaplanan doğrulukları, NS bileşeninde 0.4 mm/yıl, EW bileşeninde ise 0.6 mm/yıl'dır. Tablodan sıfır ve 1 çözümleri farklarının anlamlı olmadığı görülmektedir. Ancak yeryüzünün tümünü kapsayan tektonik çalışmalarda uydu parametreleri ve kutup hareketi parametrelerinin diğer jeodezik parametrelerle birlikte kestirilmesi, jeodezik parametrelerin güvenilirliğini artırıcı etki yapmaktadır. Keza bu parametrelerin fonksiyonel modele dahil edilmemesi halinde zaman serilerinde ortaya çıkacak uyşumsuz nokta sayısı, dahil edilmeleriyle elde edilecek zaman serilerinden % 30 dolayında daha fazla olduğu gözlenmiştir. Bu durum özellikle kısa süreli zaman serilerinin değerlendirilmesinde önemli olmaktadır. 2 ve 3 çözümlerinin, sıfır çözümleri ile karşılaştırılması sonucunda, bu çözümlerin doğru sonuçlar üretmediği görülmüştür. Özellikle EW bileşeninde, NS bileşenine göre 3

kata varan farklar gözlenmektedir. Bu çözümlerde, JPL tarafından önerilen 10 adet noktaya ek olarak JPL listesinde olmayan 4 noktanın da dahil edilmesiyle 14 dayanak noktası kullanılarak bir deneme gerçekleştirilmiştir. Bu 4 dayanak noktasının çözüme dahil edilmesinin, çözüm üzerindeki olumsuz etkisi açık bir şekilde görülmektedir. NS ve özellikle EW bileşenlerindeki farkların büyüklüğü ve anlamlılığı bu çıkarımı doğrulamaktadır. 4 ve 5 çözümlerinin karşılaştırılmasıyla; küçük boyutlu ağlarda uydu ve kutup hareketi parametrelerinin fonksiyonel modele dahil edilmesi, sonuçları kötüleştirmektedir yargısına varılabilir. Sonuç olarak Anadolu örneğinde olduğu gibi inceleme alanını çevreleyen bir ağın değerlendirilmesi ve bu ağdan 6. Bölümde verilen kriterler göz önüne alınarak seçilecek güvenli noktalarla referansın oluşturulması, küresel çözümle hemen hemen aynı sonuçları üretmektedir. Ancak datumun farklı seçimleri ile çok farklı hız bileşenlerinin ortaya çıktığı görülmüştür. Dolayısıyla tektonik çalışmalarda datumun etkisi büyüktür ve uygun seçilmemesi halinde yanlış tektonik yorumlamalar yapılması tehlikesi ortaya çıkabilmektedir.

Tablo 7.1 Uygulama ağında farklı çözümlerden elde edilen hız bileşenlerinin karşılaştırılması (mm/yıl)

	1-0		2-0		3-0		4-0		5-0	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
ANKR	-0.2	-0.3	1.5	4.8	1.6	3.9	-0.2	2.2	-0.3	0.6
ISTA	-0.1	-0.3	1.5	4.7	1.6	4.0	-0.3	1.7	-0.5	0.6
TRAB	-0.1	-0.3	1.6	4.6	1.9	3.4	0.1	2.2	0.0	0.5
TUBI	-0.1	-0.4	1.5	4.8	1.5	3.9	-0.2	1.8	-0.5	0.5
(Farkların doğruluğu: NS de 0.4 mm/yıl; EW de 0.6 mm/yıl)										

Yeryüzü noktalarını temsil eden istasyonların koordinatlarının, yatay bileşenleri NS ve EW'nin zaman serileri ile incelenmesi sonucunda bazı istasyonlarda (örneğin Arjantin'deki UNSA istasyonunda) 6 mm ye varan genliğe sahip periyodik hareketler gözlenmiştir. Hızların doğru olarak yorumlanması açısından, bunların lineer ya da periyodik değişim özelliklerinin bilinmesinde çok yarar vardır. Bu yüzden de istasyonların hız bileşenlerinin kestiriminde altı aylık ve yıllık periyodik bileşenlerle genişletilmiş lineer regresyon uygulanmalıdır. Periyodik bileşenlerin gözönüne alınmasının, istasyona ait zaman serisinin otokorelasyonunu da etkilediği görülmüştür.

Genel olarak bütün zaman serilerinde, serilerin trendi elimine edildikten sonra elde edilen düzeltmelerin güç spektrumu, frekansın logaritmasıyla lineer azalan bir gidiş göstermektedir. Bir başka deyişle spektrumun yüksek frekanslı bir kesimine kadar sınırlandırılarak hesap edilen spektral indeks -1 değerine yakın çıkmaktadır. Bu, zaman serilerinde ardışık çözümlerin birbirleriyle korelasyonlu olmaları anlamına gelmektedir. Bunun sonucunda trendi elimine edilmiş seriye ait düzeltmelerle hesap edilecek hız bileşenlerinin doğruluğu oldukça optimistik değerler olarak ortaya çıkmaktadır. Burada söz konusu olan, zaman serisi elemanları arasındaki bağımlılığı ortaya çıkarabilmek için, zaman serilerinin elemanlarının oluşumunda uydu sinyal kayıtlarının örnekleme aralıklarının değiştirilmesi yoluna gidilmiştir. Bir günden yirmibir güne kadar değişen örnekleme aralıklarıyla hesaplar yinelenmiş ve elde edilen doğruluklar karşılaştırılmıştır. Ölçülerin bağımsızlığını ifade eden geniş örnekleme aralığından bulunan sonuçların doğruluklarının 2 ile 6 kat büyüdüğü görülmüştür. Bu sonuçlar **Williams (2003)** de yer alan ifadeleri doğrulamaktadır. Zaman serilerinden anlamlı ve gerçeğe yakın doğrulukları kestirmek üzere şimdiye kadar maksimum olabilirlik kestirimi birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır (**Zhang ve diğ., 1997; Mao ve diğ., 1999; Nikolaidis, 2002**). Maksimum olabilirlik kestirimiyle hareket hızlarının doğruluklarının hesabında varsayımlara bağıllığı aşabilmek için bu çalışmada serinin trendi elimine edildikten sonra elde edilen düzeltmelerin otokorelasyonu ve güç spektrumu kullanılarak ve hiçbir varsayıma gerek olmaksızın bileşenlerin doğrulukları elde edilmeye çalışılmıştır. Önerilen metod, GPS zaman serilerinin analizinde **Caporali (2003)** tarafından kullanılan ve varsayımlardan bağımsız bir metod olan Allan varyans metoduna da alternatif olarak kullanılabilir.

Zaman serilerinden trendin elimine edilmesi için kullanılan lineer regresyon, seride çeşitli nedenlerle yön değiştirme ya da kısa süreli ve serinin genel seyrine aykırı bir gidiş olması durumunda hızın yanlış kestirilmesine neden olabilmektedir. Bu tür olumsuzluklar zaman serilerinin wavelet analizi kullanılarak aşılabilmektedir. 17 Ağustos 1999 Gölcük depremi ertesinde oluşan ve 2000 yılının sonlarına kadar görülen post-sismik hareket neticesinde Anadolu ve Avrasya plakasında yer alan 4 IGS istasyonunun çeşitli zaman dilimleri için hızları Tablo 7.2’de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tablo başlığında koyu olarak gösterilen sayılar 2000 yılının başından itibaren gün biriminde zaman dilimlerini göstermektedir. Tablodan post-

sismik hareket etkisinin istasyon hızlarına yansımaları açık bir şekilde görülmektedir. Zaman serilerinde çeşitli nedenlerle ortaya çıkan süreksizlikler yine wavelet dönüşümü ile ortaya çıkarılabilir. Wavelet dönüşümünün bir başka avantajı soncul varyansın, öncül varyans ile karşılaştırıldığı model testinin geçerli olmadığı zaman serilerinde süzgeçleme ile serinin trendinin elimine edilmesiyle elde edilecek düzeltmelerle daha doğru soncul standart sapma bulunabilmesidir.

Tablo 7.2 Wavelet dönüşümü ile süzgeçlenen zaman serilerinden hesaplanan hız bileşenleri (mm/yıl biriminde)

	NS				EW	
	1-300	150-300	301-1096	1-1096	200-1096	1-1096
ANKR	-	-	-	10.3	-	1.2
ISTA	-0.6	-	6.9	5.5	-	28.9
TRAB	-	0.0	11.3	11.4	-	26.0
TUBI	-1.4	-	5.9	4.9	26.4	29.5
Hız bileşenlerinin doğruluğu: NS de 0.3 mm/yıl ; EW de 0.4 mm/yıl						

Wavelet analizinin özellikle istasyonun post-sismik davranışını incelemede objektif sonuçlara ulaşma bakımından yararlı olduğu görülmüştür. Şu an IGS kapsamında faaliyet gösteren IGS istasyonu sayısı, kullanıcının müdahalesine ve bu istasyonların zaman serilerini kalitatif analizine izin veren boyutlardadır. Bu ağdaki istasyon sayısının 1000’li rakamlara ulaşması durumunda hızlı bir analiz nasıl yapılacaktır? Örnek olarak tektonik olarak aktif bir bölgede bulunan ve bütün Çin’in yüzeyini kapsamaları düşünülerek tasarlanan 2000 noktalı bir ağın faaliyete geçmesiyle sürekli veri toplayacak sabit istasyonlardan elde edilecek zaman serilerinin analizi için kantitatif yöntemleri kullanan bir otomasyona gidilmesi gerekmektedir. Bu otomasyon için wavelet analizi en ideal yöntemlerden biri olarak önerilebilir.

KAYNAKLAR

- Akçın, H., 1998. GPS ölçülerinden pratik yüksekliklerin elde edilmesi üzerine bir araştırma, *Doktora Tezi*, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Aksoy, A. ve Ayan T., 1987. Global Konum Belirleme Yöntemi GPS, *HKMO 1. Harita Kurultayı*, Ankara, s. 523-534.
- Altamimi, Z. ve diğ., 2001. The Terrestrial Reference Frame and the Dynamic Earth, *EOS Trans AGU*, **82**(25), 273-379.
- Altamimi, Z., Boucher, C. ve Sillard, P., 2002a. New trends for the realization of the International Terrestrial Reference System, *Adv. Space Res.*, **30**, 175-184.
- Altamimi, Z., Sillard, P. ve Boucher, C., 2002b. ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for the earth science applications, *Journal of Geophysical Research*, **107**, ETG2 1-19.
- Argus, D.F. ve Gordon, R.G., 1996. Test of the rigid-plate hypothesis and bounds on intraplate deformation using geodetic data from very long baseline interferometry, *Journal of Geophysical Research*, **101**, 13555-13572.
- Ayan, T., 1992. Uyuşumsuz ölçüler testi, *Harita ve Kadastro Mühendisliği*, **72**, 38-46.
- Balmino, G., 2001. New space missions for mapping the Earth's gravity field, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IV - Physics*, **2**, 1353-1359.
- Beutler, G. ve diğ., 1994. Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the international GPS service for geodynamics (IGS): theory and initial results, *Manuscripta Geodaetica*, **19**, 367-386.
- Beutler, G. ve diğ., 1998. The GPS as a tool in global geodynamics, in *GPS for Geodesy*, pp. 569-598, Eds. Teunissen, P. J. G & Kleusberg, A., Springer-Verlag, Berlin.
- Blewitt, G., 1989. Carrier phase ambiguity resolution for the Global Positioning System applied to geodetic baselines up to 2000 km, *Journal of Geophysical Research*, **94**, 10187-10203.
- Blewitt, G. ve diğ., 2001. A new global mode of earth deformation: seasonal cycle detected, *Science*, **294**, 2342-2345.

- Blewitt, G. ve Lavallée, D., 2002. Effect of annual signals on geodetic velocity, *Journal of Geophysical Research*, **107**, ETG9 1-11.
- Bock, O. ve Doerflinger, E., 2001. Atmospheric modeling in GPS data analysis for high accuracy positioning, *Phys. Chem. Earth (A)*, **26**, 373-383.
- Bock, Y. ve diğ., 1986. Interferometric analysis of GPS phase observations, *Manuscripta Geodaetica*, **11**, 282-288.
- Bock, Y., 1998. Reference Systems, in *GPS for Geodesy*, pp. 1-41, Eds. Teunissen, P. J. G & Kleusberg, A., Springer-Verlag, Berlin.
- Brigham, E. O., 1988. The Fast Fourier Transform and its Applications, Prentice Hall, New Jersey.
- Capitaine, N. ve diğ., 2002. Proceedings of the IERS Workshop on the Implementation of the new IAU Resolutions, IERS Technical Note No: 29, Verlag des BKG, Frankfurt am Main.
- Caporali, A., 2003. Average strain rate in the Italian Crust inferred from a permanent GPS network- I. Statistical analysis of the time-series of permanent GPS stations, *Geophys. J. Int.*, **155**, 241-253.
- Chui, C. K., 1992. An Introduction to Wavelets, Academic Press, San Diego.
- Colombo O., 1989. The dynamics of GPS orbits and the determination of precise ephemerides, *Journal of Geophysical Research*, **94**, 9167-9182.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., ve Stein, S., 1990. Current plate motions, *Geophysical Journal*, **101**, 425-478.
- DeMets, C., Gordon, R. G., Argus, D. F., ve Stein, S., 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motion, *Geophys. Res. Lett.*, **21**, 2191-2194.
- Demirel, H., 1992. Sıklaştırma ağlarında datum tanımlama ve bağlantı noktalarının test edilmesi, *Harita ve Kadastro Mühendisliği*, **72**, 47-55.
- Deniz, R. ve diğ., 2003. Uluslararası Jeodezik Referans Sistemleri ve CBS, *TUJK Coğrafi Bilgi Sistemleri ve Jeodezik Ağlar Çalıştayı Bildiriler’de*, s. 115-125, Editörler: Yıldız, F., Üstün, A. ve Bildirici, Ö., Nobel, Konya.
- Depenthal, C., 2000. Einfluß der Atmosphäre auf GPS-Beobachtungen im Bereich der Antarktis, in *Deutsche Beiträge zu GPS-Kampagnen des Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) 1995-1998*, pp. 195-199, Hrs. Dietrich, R., DGK, Reihe B, Heft 310, München.
- Doğan, U. ve diğ., 2003. Estimation of the time-dependent crustal movements of the Izmit Earthquake, *J. Geodynamics*, **36**, 615-632.

- Dong, D., Herring, T. A. ve King, R. W., 1998.** Estimating regional deformation from a combination of space and terrestrial geodetic data, *Journal of Geodesy*, **72**, 200-214.
- Dong, D. ve diğ., 2002.** Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site positioning time series, *Journal of Geophysical Research*, **107**, ETG9 1-18.
- Dunn, P., Torrence, M., Kolenkiewicz, R. ve Smith, D., 1999.** Earth scale defined by modern satellite ranging observations, *Geophysical Research Letters*, **26**, 1489-1492.
- Ergintav, S. ve diğ., 2002.** Postseismic Deformation near the İzmit Earthquake (17 August 1999, M 7.5) Rupture Zone, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **92**, 194-207.
- Fliegel, H. F., Gallini, T. E. ve Swift, E. R., 1992.** Global Positioning System radiation force model for geodetic applications, *Journal of Geophysical Research*, **97**, 559-568.
- Fricke, W., 1982.** Determination of the Equinox and Equator of the FK5, *Astron. Astrophys.*, **107**, L13-L16.
- Hatanaka, Y., 1996.** A RINEX compression format and tools, *Proceedings of ION GPS-96*, Kansas City, Missouri, September 1996, 177-183.
- Herring, T. A. ve diğ., 1990.** Geodesy by radio astronomy: the application of Kalman filtering to very long baseline interferometry, *Journal of Geophysical Research*, **95**, 12561-12581.
- Herring, T. A., 2000.** GLOBK Global Kalman filter VLBI and GPS Analysis Program v. 10.0, *Massachusetts Institute of Technology and Scripps Institute of Oceanography Technical Report*, Cambridge, MA.
- Heiskanen, W. A. ve Moritz, H. 1967.** Physical Geodesy, W. H. Freeman and Company, San Francisco and London.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., ve Collins, J. 1997.** GPS: Theory and Practice, Springer, New York.
- IERS, 2002.** Explanatory Supplement to IERS Bulletins A and B, International Earth Rotation Service (IERS), <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/products/bulletins/explanatory.html>.
- Ifadis, I. M. and Savvaidis, P., 2001.** Space to earth geodetic applications: Approaching the atmospheric effect, *Phys. Chem. Earth (A)*, **26**, 195-200.
- IGS, 2001.** Access to IGS data, International GPS Service (IGS), <http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/usage.html>.

- IGSMail-4281**, 2003. IGS Reference site candidates (<http://igscb.jpl.nasa.gov/mail/igsmail/2003/msg00059.html>).
- Illner, M. ve Jager, R.**, 1993. Ein Konzept zur Integration von GPS in Verdichtungsnetze- Modellbildung und Ableitung von zugehorigen Genauigkeits- und Zuverlassigkeitsmassnahmen, *Zeitschrift fur Vermessungswesen*, 552-574.
- Joeckel, R. ve Stober, M.**, 1995. Elektronische Entfernungs- und Richtungsmessung, 3. Auflage, Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart.
- Kearey, P. ve Vine, F. J.**, 1996. Global Tectonics, Blackwell Science, Oxford.
- Kılıoğlu, A.**, 1999. İTÜ-ETHZ-TUJJB GPS projesinde değişik kampanya olulerinin birleştirilmesi ve sonularının yerkabuğu hareketleri yonnden incelenmesi, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitusu, İstanbul.
- King, N. E. ve diğ.**, 1995. Continuous GPS observations across the Hayford fault, California, 1991-1994, *Journal of Geophysical Research*, **100**, 20271-20283.
- King, R.W. ve diğ.**, 1987. Surveying with GPS, F. Dummmler, Bonn.
- King, R. W. ve Bock, Y.**, 1999. Documentation of the GAMIT GPS Analysis Software v. 10.0, *Massachusetts Institute of Technology and Scripps Institute of Oceanography Technical Report*, Cambridge, MA.
- King, R.W.**, 2002. Kişisel Goruşme.
- Koch, K. R.**, 1987. Parameterschatzung und Hypothesentests in Linearen Modellen, F. Dummmler, Bonn..
- Koch, K. R. ve Schmidt, M.**, 1994. Deterministische und Stochastische Signale, Ferd. Dummmler, Bonn.
- Koçak, M. G.**, 1999. Untersuchung der Neigungs- und Exzentrizitatsfunktionen und Darstellung des Gravitationspotentials der Erde in Keplerelementen, *Diplomarbeit*, Universitat Karlsruhe, Karlsruhe
- Kuang, D., Schutz, B. E. ve Watkins, M. M.**, 1996. On the structure of geometric positioning information in GPS measurements, *Journal of Geodesy*, **71**, 35-43.
- Kumar, K. V., Miyashita, K., Li, J.**, 2002. Secular crustal deformation in central Japan, based on the wavelet analysis of GPS-time series data, *Earth Planets Space*, **54**, 133-139.
- Kumar, P. ve Georgiou, E. F.**, 1994. Wavelet Analysis in Geophysics: An Introduction, in *Wavelets in Geophysics*, pp. 1-43, Eds. Georgiou, E. F. & Kumar, P., Academic Press, San Diego.

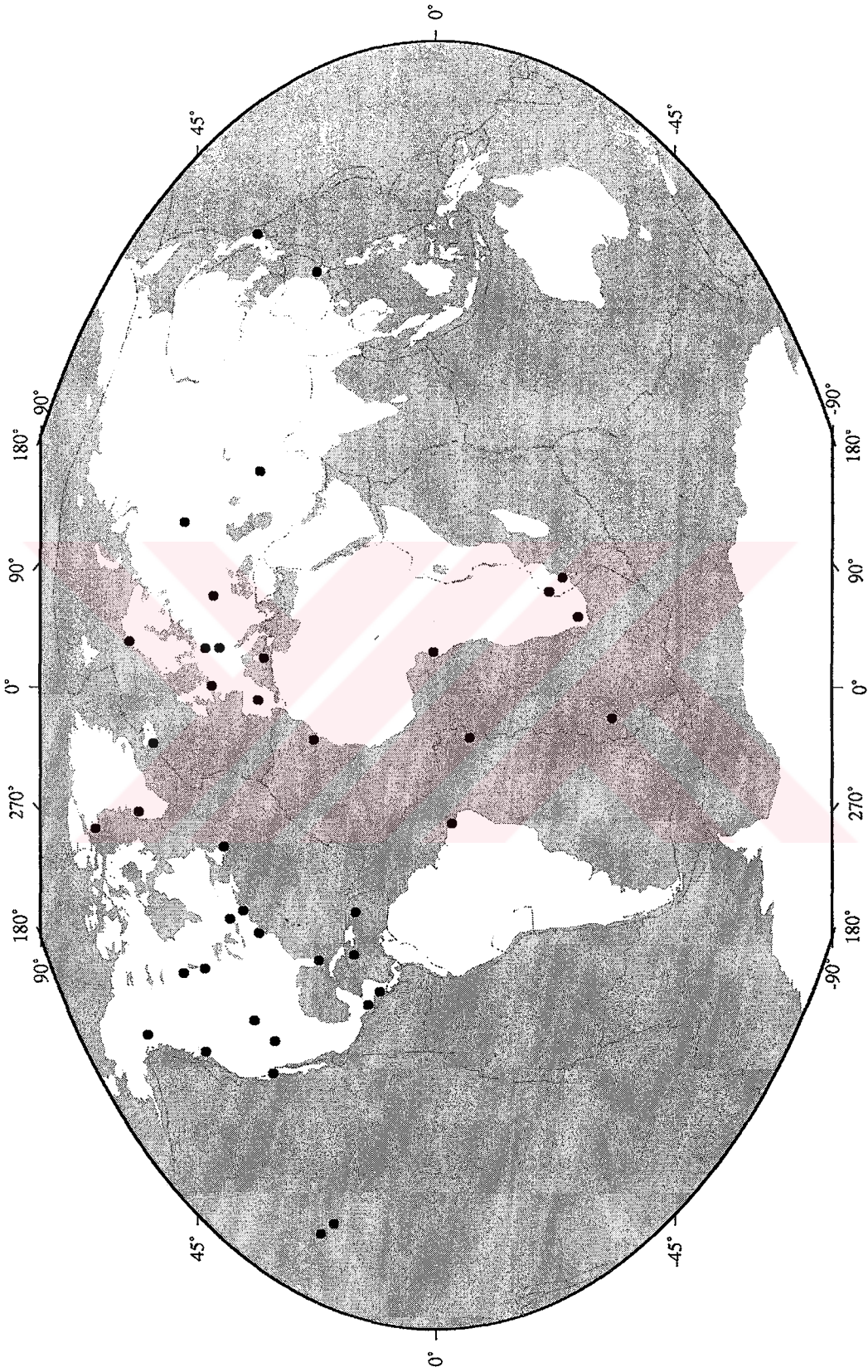
- Kutoğlu, Ş. H.**, 2001. GPS ağlarının ülke nirengi ağlarına entegrasyonu, *Doktora Tezi*, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Larson, K. M. ve Agnew, D. C.**, 1991. Application of the Global Positioning System to crustal deformation, 1. Precision and accuracy, *Journal of Geophysical Research*, **96**, 16547-16566.
- Leick, A.**, 1995. GPS Satellite Surveying, John Wiley and Sons., USA.
- Lenk, O. ve diğ.**, 2003. Monitoring the Kinematics of Anatolia using permanent GPS network stations, *Turkish J. Earth Sci.*, **12**, 55-65.
- Lomb, N. R.**, 1976. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data, *Astrophys. and Space Sci.*, **39**, 447-462.
- Louis, A. K. ve diğ.**, 1998. Wavelets, Teubner, Stuttgart.
- Ma, C. ve diğ.**, 1998. The International Celestial Reference Frame as realized by Very Long Baseline Interferometry, *The Astronomical Journal*, **116**, 516-546.
- Mao, A., Harrison, C. G. A., ve Dixon, T. H.**, 1999. Noise in GPS coordinate time series, *Journal of Geophysical Research*, **104**, 2797-2816.
- McCarthy, D. D.**, 1996. International Earth Rotation Service Conventions (1996), IERS Technical Note 21, Observatoire de Paris.
- McCarthy, D. D. ve Petit, G.**, 2004. International Earth Rotation Service Conventions (2003), IERS Technical Note 32, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.
- Menge, F., Völksen, C. ve Seeber, G.**, 2000. Analyse von SCAR GPS Epochen- und Permanentstationsdaten aus der Antarktis mit GIPSY/OASIS II, in *Deutsche Beiträge zu GPS-Kampagnen des Scientific Committee on Antarctic Research (SCAR) 1995-1998*, pp. 91-108, Hrs. Dietrich, R., DGK, Reihe B, Heft 310, München.
- Montag, H.**, 1997. Zu einigen Grundlagen globaler und regionaler Referenzsysteme, in *DVW-Schriftenreihe* 28, pp. 20-33, Wittwer, Stuttgart.
- Niell, A. E.**, 1996. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research*, **101**, 3227-3246.
- Nikolaidis, R.**, 2002. Observation of geodetic and seismic deformation with the GPS, *PhD Thesis*, University of California, San Diego, CA.
- Özgen, M. G. ve Deniz, R.**, 1986. Elektromagnetik Dalgalarla Jeodezik Ölçmeler (Elektrometri), Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul.
- Papoulis, A. ve Pillai, S. U.**, 2002. Probability, Random Variables and Stochastic Processes, McGraw Hill, New York.

- Percival, D. B. ve Walden, T. G.**, 2000. Wavelet Methods for Time Series Analysis, Cambridge University Press, Cambridge.
- Press ve diğ.**, 1999. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, Cambridge.
- Reigber, C.**, 1997. IERS und IGS-Stand und Perspektiven, in *DVW-Schriftenreihe* 28, pp. 34-39, Wittwer, Stuttgart.
- Rothacher, M. ve diğ.**, 2001. High-frequency variations in earth rotation from GPS data, *Journal of Geophysical Research*, **106**, 13711-13738.
- Scargle, J. D.**, 1982. Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis, *The Astrophysical Journal*, **263**, 835-853.
- Schaffrin, B. ve Bock, Y.**, 1988. A unified scheme for processing GPS dual-band phase observations, *Bulletin Géodésique*, **62**, 142-160.
- Scherneck, H. G.**, 1991. A parameterized solid earth tide model and ocean tide loading effects for global geodetic baseline measurements, *Geophys. J. Int.*, **106**, 677-694.
- Schmidt, M. ve Schuh, H.**, 1999. Wavelet-Analyse der mit VLBI beobachteten Nutationsreihen, *Zeitschrift für Vermessungswesen*, **124**, 24-30.
- Schmidt, M.**, 2001. Wavelet-Analyse von Erdrotationsschwankungen, *Zeitschrift für Vermessungswesen*, **126**, 94-100.
- Schwarz, H. R.**, 1997. Numerische Mathematik, B. G. Teubner, Stuttgart.
- Schwintzer ve diğ.**, 1997. Long-wavelength global gravity field models: GRIM4-S4, GRIM4-C4, *Journal of Geodesy*, **71**, 189-208.
- Seeber, G.**, 1993. Satellite Geodesy, Walter DeGruyter, Berlin.
- Seidelmann, P. K. ve Fukushima, T.**, 1992. Why new time scales, *Astron. Astrophys.*, **265**, 833-838.
- Senior, K., Koppang, P. ve Matsakis, D.**, 2001. Developing an IGS time scale, *Proceedings of the IEEE/EIA International Frequency Control Symposium*, Seattle, WA, 6-8 August, s. 211-218.
- Springer, T. A., Beutler, G. ve Rothacher, M.**, 1999. Improving the orbit estimates of GPS satellites, *Journal of Geodesy*, **73**, 147-157.
- Springer, T. A.**, 2000. Common interests of the IGS and IVS, *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2000 General Meeting Proceedings*, pp. 296-305, Eds. Vandenberg, N. R. & Baver, K. D., NASA/CP-2000-209893.

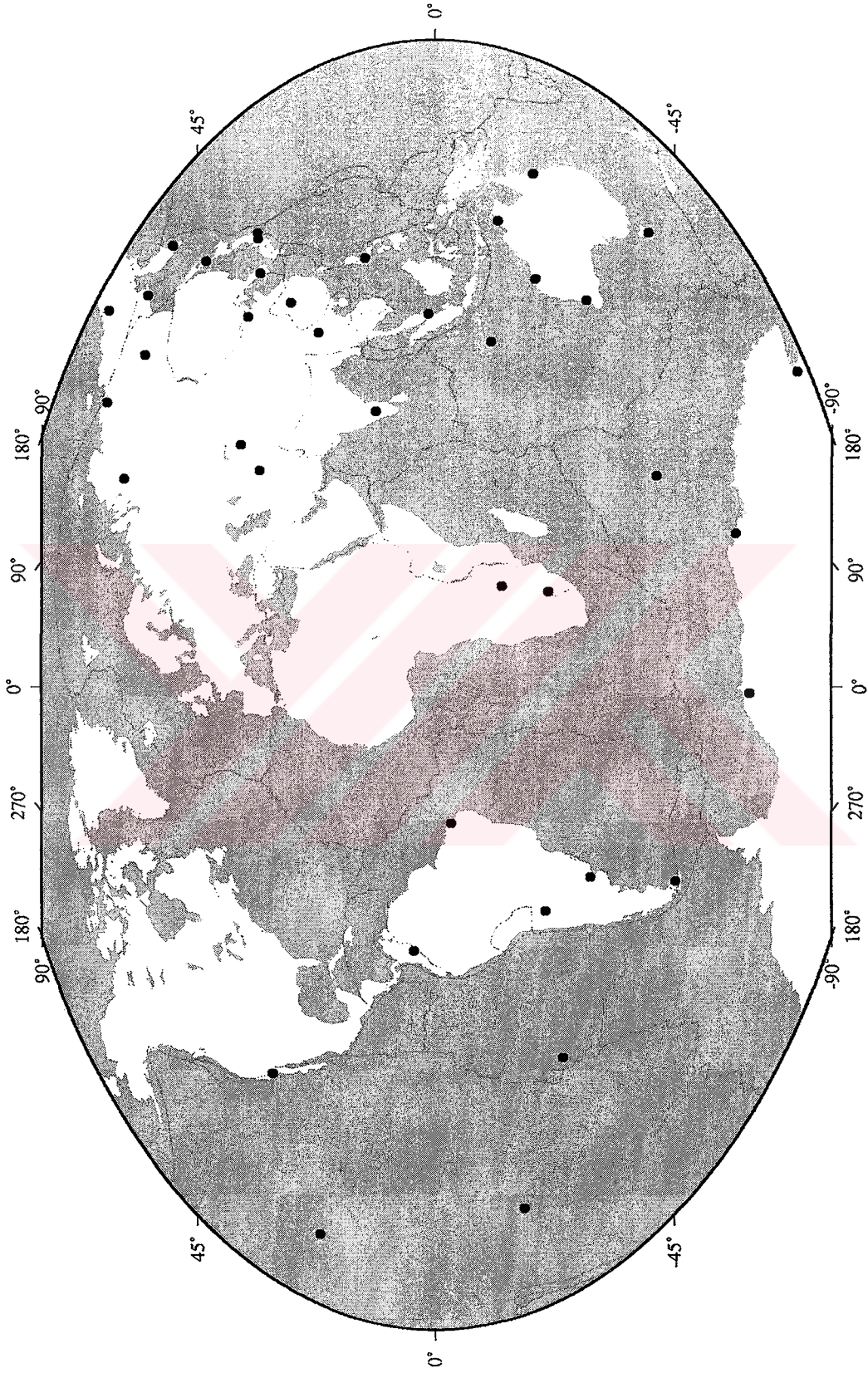
- Standish, E. M., Newhall, X X, Williams, J. G. ve Folkner, W. F., 1995.** JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE403/LE403, *Jet Propulsion Laboratory Interoffice Memorandum*, **JPL IOM 314.10-127**, Pasadena, CA.
- Standish, E. M., 1998.** JPL Planetary and Lunar Ephemerides, DE405/LE405, *Jet Propulsion Laboratory Interoffice Memorandum*, **JPL IOM 312.F-98-048**, Pasadena, CA.
- Torge, W., 1975.** Geodäsie, Walter DeGruyter, Berlin.
- van Dam, T. M. ve Herring, T. A., 1994.** Detection of atmospheric pressure loading using very long baseline interferometry measurements, *Journal of Geophysical Research*, **99**, 4505-4517.
- van Dam, T. M. ve diğ. 2001.** Crustal displacements due to continental water loading, *Geophysical Research Letters*, **28**, 651-654.
- Wenzel, H. G., 1997.** Tide Generating Potential for the Earth, in *Tidal Phenomena*, pp. 9-26, Eds. Wilhelm, H., Zürn, W. & Wenzel, H. G., Springer-Verlag, Berlin.
- Whitney, A. R., 2000.** How do VLBI correlators work?, in *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2000 General Meeting Proceedings*, pp. 187-205, Eds. Vandenberg, N. R. & Baver, K. D., NASA/CP-2000-209893.
- Williams, S. D. P., 2003.** The effect of coloured noise on the uncertainties of rates estimated from geodetic time series, *Journal of Geodesy*, **76**, 483-494.
- Wübbena, G., 2001.** Zur Modellierung von GNSS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung, in *Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Festschrift Prof. G. Seeber zum 60. Geburtstag*, 143-155.
- Yaşayan, A., 1992.** Robust kestirim kavramı, ilkesi ve uygulamaları üzerine irdelemeler, *Harita ve Kadastro Mühendisliği*, **72**, 56-66.
- Zhang, J. ve diğ., 1997.** Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities, *Journal of Geophysical Research*, **102**, 18057-18070.
- Zumberge, J. F., Neilan, R. E. ve Mueller, I. I., 1994.** Densification of the IGS global network, in *IGS Workshop Proceedings: Densification of the IERS Terrestrial Reference Frame through regional GPS networks*, pp. 1-14 Eds. Zumberge, J. F. & Liu, R.
- Zumberge, J. F. ve diğ., 1997.** Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, **102**, 5005-5017.

EKLER

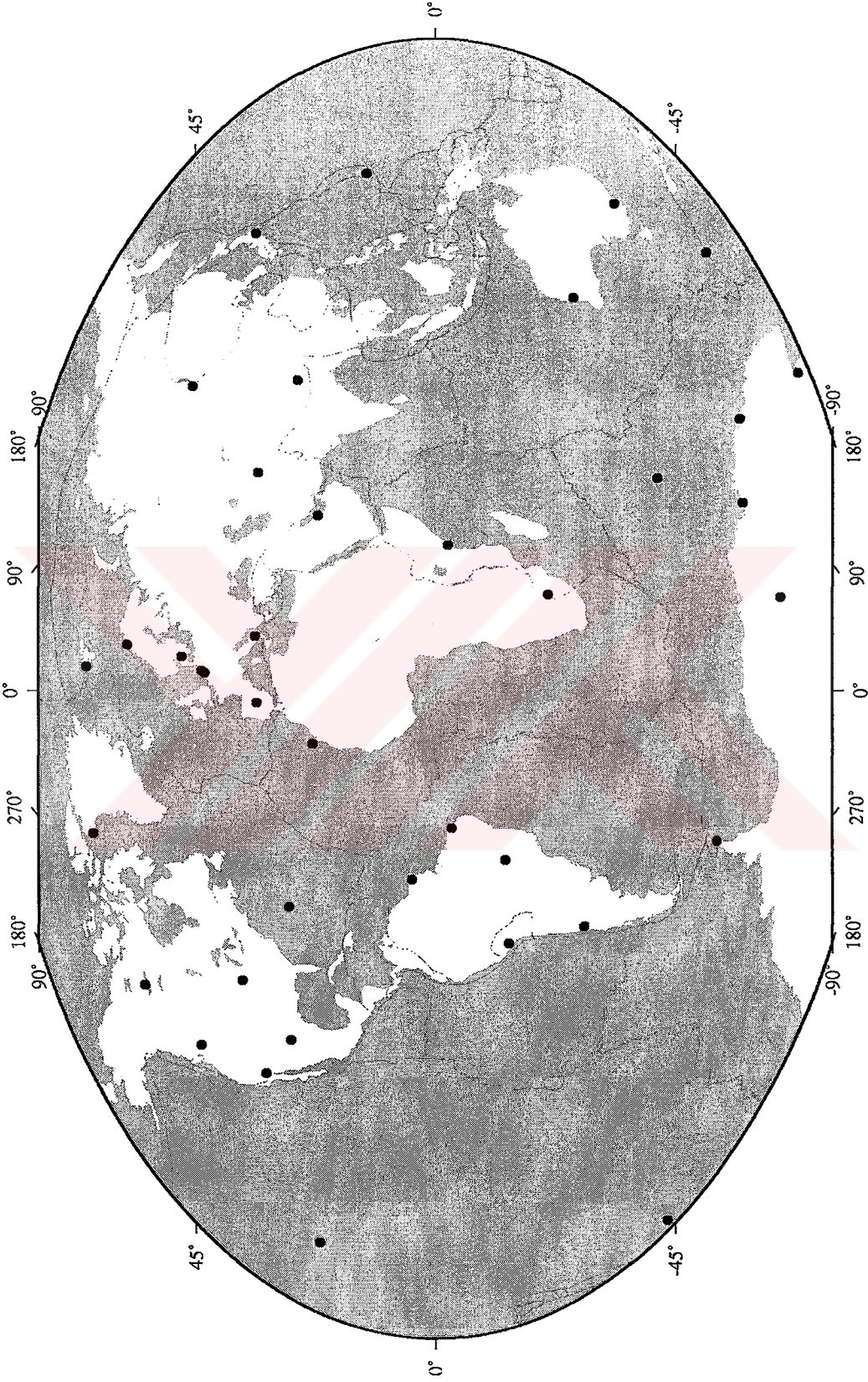




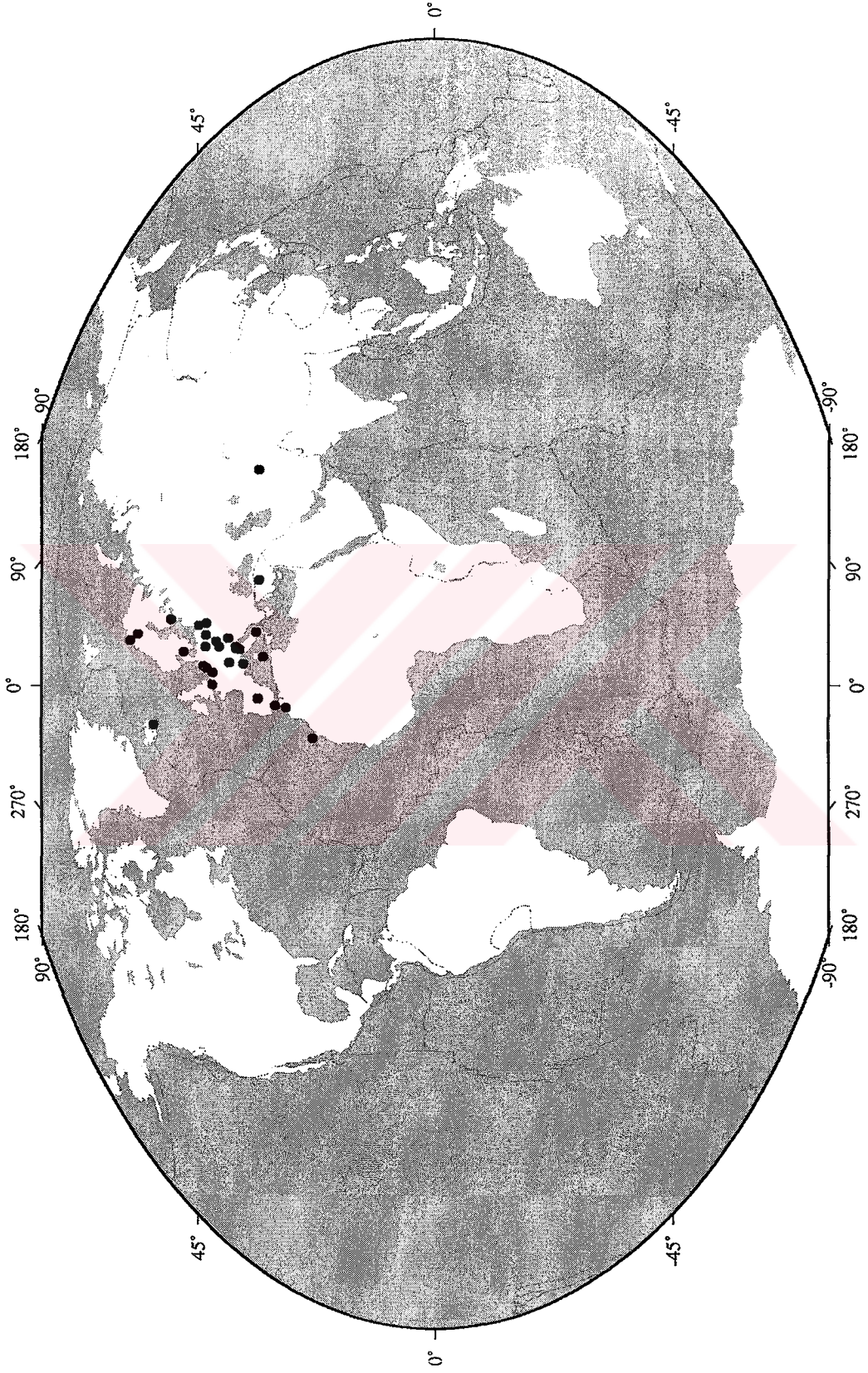
Şekil A.1 igs1 ağı noktaları



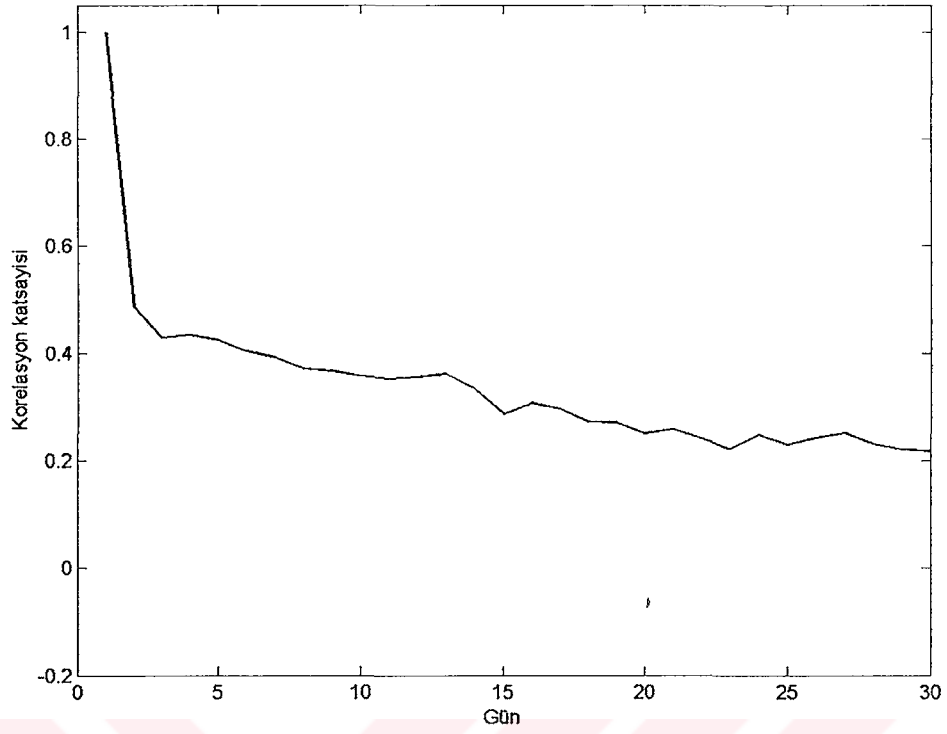
Şekil A.2 igs2 ağı noktaları



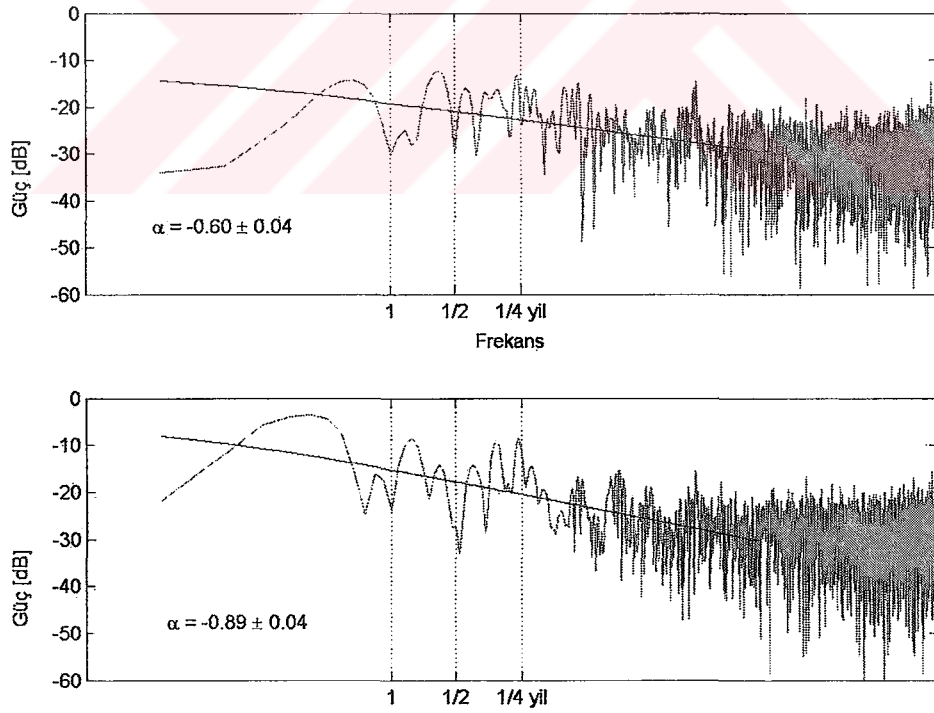
Şekil A.3 igs3 ağı noktaları



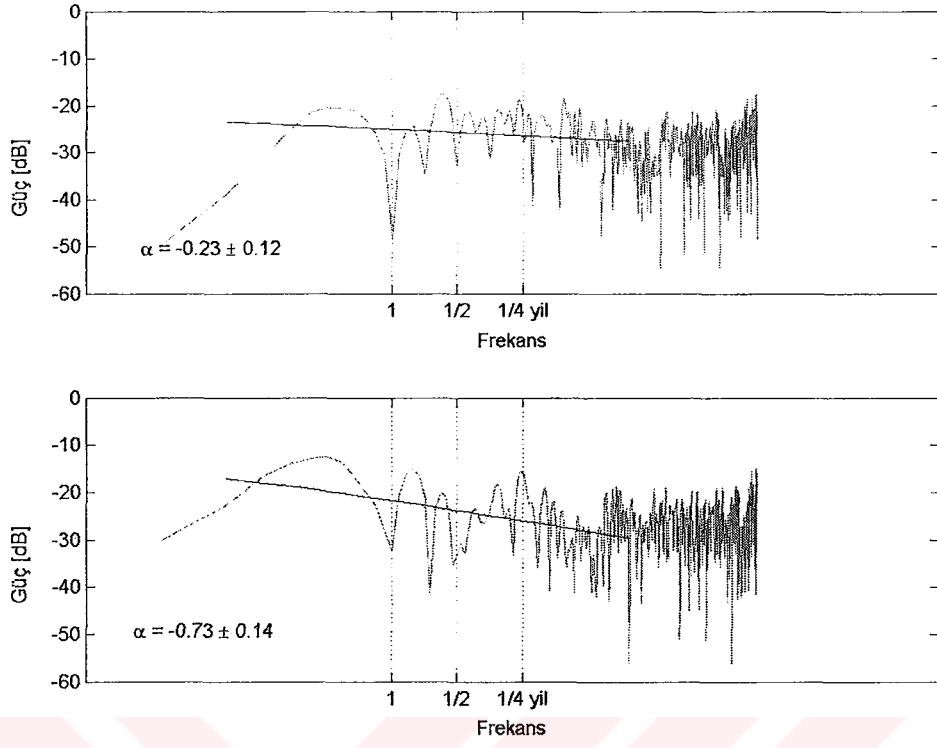
Şekil A.4 eura ağı noktaları



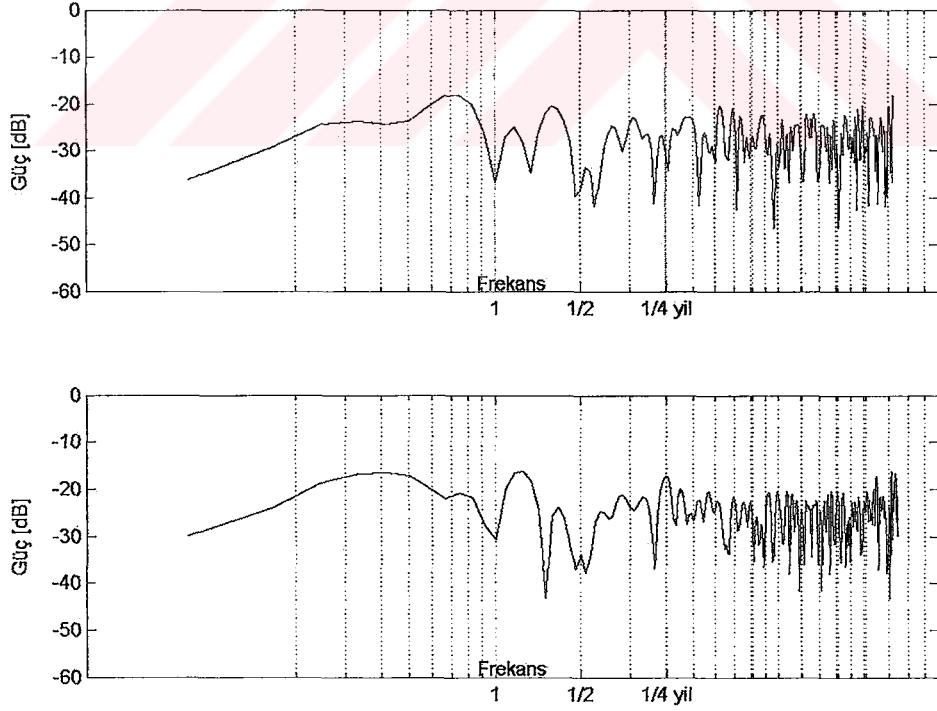
Şekil A.5 WTZR EW bileşeni zaman serisinin otokorelasyonu



Şekil A.6 WTZR zaman serilerinin 1 gün örnekleme aralıklı genişletilmiş lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu



Şekil A.7 WTZR zaman serilerinin 7 gün örnekleme aralıklı genişletilmiş lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu



Şekil A.8 WTZR zaman serilerinin 14 gün örnekleme aralıklı genişletilmiş lineer regresyonu sonrası ölçü düzeltme değerlerinin güç spektrumu

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Güven KOÇAK, 1972 yılında Anadolu Ereğli’de doğdu. İlk ve ortaokulu Ereğli’de tamamladıktan sonra 1986 yılında Ankara Tapu ve Kadastro Meslek Lisesi’ne girdi. 1990 yılında mecburi hizmet dolayısıyla Çorum Kadastro Müdürlüğü’nde 3 ay kadar Kadastro Teknisyeni olarak görev yaptı. Aynı yıl İTÜ İnşaat Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü’ne girdi. 1994 yılında buradaki eğitimini tamamlayarak yine İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü’nde yüksek lisans öğrenimine başladı. Aynı zamanda özel bir şirkette Harita Mühendisi olarak görev yaptı. 1995 yılında MEB’in açmış olduğu Yurtdışı Lisansüstü Eğitim Sınavı’nı kazanarak Almanya’da eğitime hak kazandı. 1996 yılında Almanya’da 8 ay yabancı dil eğitimi aldıktan sonra Bonn Üniversitesi Jeodezi Enstitüsü’nde eğitime başladı. 1997 yılında Karlsruhe Üniversitesi Jeodezi Enstitüsü’ne geçiş yaparak 1999 yılında buradan lisans ve yüksek lisans diploması aldı. 2000 yılında İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda doktora öğrenimine başladı. 1999 yılı Ekim ayından beri Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Jeodezi Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Müge IŞIKLAR ile evli olup, çok iyi derecede Almanca ve iyi derecede İngilizce bilmektedir.