İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞRU HIZ KESTİRİMİ İÇİN AYLIK GPS KAMPANYALARININ PERFORMANSI ÜZERİNE BİR İNCELEME

DOKTORA TEZİ

Simge TEKİÇ RAHMANLAR
(501092613)

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

NİSAN 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DOĞRU HIZ KESTİRİMİ İÇİN AYLIK GPS KAMPANYALARININ PERFORMANSI ÜZERİNE BİR İNCELEME

DOKTORA TEZİ

Simge TEKİÇ RAHMANLAR
(501092613)

Geomatik Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ersoy ARSLAN
Eş Danışman: Prof. Dr. D. Uğur ŞANLI

NİSAN 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501092613 numaralı Doktora Öğrencisi Simge TEKİÇ RAHMANLAR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "DOĞRU HIZ KESTİRİMİ İÇİN AYLIK GPS KAMPANYALARININ PERFORMANSI ÜZERİNE BİR İNCELEME" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı:	**Prof. Dr. Ersoy ARSLAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Eş Danışmanı:	**Prof. Dr. D.Uğur ŞANLI** Yıldız Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri:	**Prof. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. M. Tevfik ÖZLÜDEMİR İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Serdar EROL İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Halis SAKA Gebze Teknik Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Bahattin ERDOĞAN Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **28 Şubat 2019**
Kabul Tarihi : **19 Nisan 2019**

Sevgili Anneme,

ÖNSÖZ

İstanbul Teknik Üniversitesi'ne kayıt yaptığım ilk günden bugüne gerek ders seçimim gerek tez çalışmamın tüm aşamalarında engin bilgi ve birikimiyle katkılar veren, yorum ve görüşleriyle yönlendirmeler yapan, özveri ve sabırla elinden gelen her türlü desteği gösteren, değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Ersoy ARSLAN'a,

Boğaziçi Üniversitesi'nde birlikte gerçekleştirdiğimiz Yüksek Lisans çalışmasında olduğu gibi, bu tez çalışmamda da konu, kaynak ve yöntem açısından çok büyük katkıları olan; samimiyeti ve güler yüzüyle kıymetli zamanını ayıran, değerli bilgilerini benimle paylaşan, saygın kişiliğiyle örnek aldığım kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Uğur ŞANLI'ya,

Tez çalışmam boyunca anlayış ve sabırla, tez fikrinin geliştirilmesinden bugüne kadar çalışmanın her aşamasında değerli katkılarını ve yönlendirmelerini esirgemeyen, ders dışındaki vakitlerde de güzel ve neşeli kahve/çay sohbetleriyle motivasyonumu artıran sevgili hocam Sayın Prof. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK'e,

Çalışmanın son halini almasında değerli katkılarını esirgemeyen sayın hocalarım Doç. Dr. M. Tevfik ÖZLÜDEMİR, Doç. Dr. Serdar Erol, Prof. Dr. Halis SAKA ve Doç. Dr. Bahattin ERDOĞAN'a

İsmini zikretmediğim ama bu süreçte dolaylı olarak bana yardımcı olan İstanbul Teknik Üniversitesi idari personeli, asistanları ve hocalarına, Yeterlilik sınavına girmemde büyük desteği olan, eski Genel Müdürüm yeni Ankara Su Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürü Sayın Prof. Dr. Cumali KINACI'ya

Çalışma saatlerimde yaptığı fedakârca lojistik destekler (kahve/çay, muhabbet, tebessüm ve sevgi) ile tez yazım konsantrasyonumun artmasına yardımcı olan ve tez yazım sürecinde üzerimde emeği olan değerli insan, bilim ve doğa dostu, Sayın Gülşen KAYBAL'a,

Yeterlik sınavına çalışma sürecinde vermiş olduğu psikolojik desteğin katkısını inkâr edemeyeceğim sevgili arkadaşım Fatma SAĞDIÇ EROL'a,

Varlığıyla başlı başına büyük bir manevi güç veren, aramızdaki mesafelere rağmen her an sıcaklığını kalbimde hissettiğim, en sıkıntılı zamanlarımda düşüncesiyle bile ruhumu ferahlatan, bugünlere gelmemde tartışmasız en büyük pay sahibi olan sevgili anneciğim, en sevdiğim öğretmenim, baş tacım Gönül DÜZGÜN'e;

Her zaman yanımda olup beni her koşulda destekleyen ve anlayan, yaşamımın kıymetli seçimlerinden biri olan, hayat arkadaşım, biricik eşim Musa RAHMANLAR'a

teşekkürü bir borç biliyor ve en içten sevgi, saygı ve şükranlarımı sunuyorum.

Nisan 2019

Simge TEKİÇ RAHMANLAR
(Harita Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ **7**
2.1 GNSS Sistemleri 7
2.1.1 GPS 7
2.1.2 GLONASS 10
2.1.3 GALILEO 11
2.1.4 COMPASS / BEIDOU 12
2.1.5 Diğer gelişmeler 13
2.2 GPS ve Özellikleri 15
2.2.1 GPS'in çalışma prensibi 15
2.2.2 GPS'in sinyalleri ve özellikleri 20
2.2.3 GPS'i öne çıkaran özellikler 22
2.2.4 Yüksek hassasiyetli GPS 24
2.3 Uluslararası GNSS Servisi 27
2.3.1 IGS yörünge/saat birleştirilmiş ürünleri 31
2.3.2 IGS ürünleri 33
2.3.2.1 IGS sonuç ürünleri 33
2.3.2.2 IGS hızlı ürünler 33
2.3.2.3 IGS ultra hızlı ürünleri 33
2.3.3 Çalışmada kullanılacak verinin elde edilmesi 34
2.3.3.1 Yörüngelerin belirlenebilmesi aşaması 34
2.3.3.2 Nokta pozisyonlarını belirleme aşaması 34
2.3.3.3 Zaman serilerinin oluşturulması aşaması 35
2.3.4 RINEX in filozofisi 37
2.3.4.1 Gözlemlerin tanımı 37
2.3.4.2 RINEX dosyalarının değişimi 38
2.4 GNSS Gözlemi Modellemesi 39
2.5 GNSS Zaman Serileri 46
2.5.1 Zaman serisinin sonuçlarını etkileyen faktörler 48
2.5.2 GPS zaman serilerinde yıllık sinyallerin jeodezik hız üzerindeki etkisi 49
3. MATERYAL VE METOT **51**
3.1 Materyal 51
3.2 Metot 55

3.2.1 Hız kestiriminde kullanılan yöntem 55
3.2.2 İstatistiksel olarak değerlendirilme 60
3.2.2.1 I. Varsayım 61
3.2.2.2 II. Varsayım 63
3.2.2.3 III. Varsayım 64
4. BULGULAR 67
4.1 IGS istasyonları hız kestirim sonuçları 67
4.2 Hız kestirimi ve buzul sonrası geri çekilme ilişkisi 71
4.3 İstatistiki değerlerin sonuçları 78
5. SONUÇLAR 83
KAYNAKLAR 87
EKLER 93
ÖZGEÇMİŞ 115

KISALTMALAR

ABD	:	Amerika Birleşik Devletleri
CDMA	:	Code Division Multiple Access (Kod Bölmeli Çoklu Erişim)
DORIS	:	Doppler Orbitography and Radio Positioning Integrated by Satellite (Uydu Doppler Orbitografi ve Bütünleşik Radyo Konumlandırma)
ECI	:	Earth Centered Inertial (Yer Merkezli İnersiyal)
ERP	:	Earth Rotation Parameters (Yeryuvarı Dönme Parametreleri)
FDMA	:	Frequency Division Multiple Access (Frekans Bölmeli Çoklu Erişim)
FTP	:	File Transfer Protocol (Dosya Aktarım Protokolü)
GLONASS	:	Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (ГЛОНАСС, Global Uydu Konumlandırma Sistemi)
GNSS	:	Global Navigational Satellite System (Global Navigasyon Uydu Sistemleri)
GPS	:	Global Positioning System (Global Konum Belirleme Sistemi)
IERS	:	International Earth Rotation and Reference System Service (Uluslararası Yer Dönme ve Referans Sistemleri Servisi)
IAG	:	International Association of Geodesy (Uluslararası Jeodezi Birliği)
IGR	:	IGS Rapid Products (IGS Hızlı Ürünleri)
IGS	:	International GNSS Service (Uluslararası GNSS Servisi)
IGV	:	IGS Ultra Rapid Products (IGS Ultra Hızlı Ürünleri)
InSAR	:	Interferometric Synthetic Aperture Radar (Interferometik Yapay Açıklıklı Radar)
IRNSS	:	Indian Regional Navigation Satellite System (Hindistan Bölgesel Uydu Konumlandırma Sistemi)
ITRF	:	International Terrestrial Reference Frame (Uluslararası Yersel Referans Çerçevesi)
ITRS	:	International Terrestrial Reference System (Uluslararası Yersel Referans Sistemi)
JPL	:	Jet Propulsion Laboratory (Jet İtki Laboratuvarı)
MIT	:	Massachusetts Institute of Technology
MITES	:	Miniature Interferometer Terminals for Earth Surveying (Minyatür Yer Araştırma Enterferometre Tesisleri)
NASA	:	National Aeronautics and Space Administration (Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi)
QZSS	:	Quasi-Zenith Satellite System (Quasi-Zenith Uydu Sistemi)
RINEX	:	Receiver Independent Exchange (Alıcı Bağımsız Değişim Formatı)
RMS	:	Root Mean Square (Karesel Ortalama Hata)
RTS	:	Real Time Service (Gerçek Zamanlı Servis)
SBAS	:	Satellite Based Augmenting (Uydu Bazlı Alan Büyütme Sistemleri)
SI	:	International System of Units (Uluslararası Birim Sistemi)
SINEX	:	Solution Independent Exchange (Çözümden Bağımsız Değişim)
SLR	:	Satellite Laser Ranging (Uydu Lazer Uzaklık Ölçmeleri)

SSCB	:	Sovyet Sosyalist Cumhuriyeti Birliği
TDT	:	Terrestrial Dynamical Time (Yersel Dinamik Zaman)
TEC	:	Total Electron Content (Toplam Elektron İçeriği)
TIA	:	International Atomic Time (Uluslararası Atomik Zaman)
UNAVCO	:	University Navstar Concorsium (Navstar Üniversitesi Konsorsiyum)
UTC	:	Coordinated Universal Time (Eş Güdümlü Evrensel Zaman)
VLBI	:	Very Long Baseline Interferometry (Çok Uzun Bazlı Enterferometri)
WGS	:	World Geodetic System (Dünya Jeodezik Sistemi)
WLPB	:	Wide Lane Phase Bias (Geniş Dalga Boyu Faz Sapması)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Fırlatılma Yıllarına Göre Uydu Blokları ve Sayıları. Navigation Center (2018)'den uyarlanmıştır. 9
Çizelge 2.2: Global Konumlama Sistemleri ve Özellikleri Özet Çizelgesi. 14
Çizelge 2.3: GPS'e Uygulanan Modeller ve Teknolojide Yaşanan Gelişmeler. Blewit (2015)'tan Uyarlanmıştır. 23
Çizelge 2.4: IGS Ürünlerinin Doğruluk Seviyeleri. 29
Çizelge 2.5: NASA'dan Elde Edilem Zaman Serileri Formatı. 36
Çizelge 2.6: UNIX Sistemler için IGS Ürünlerine Ait Veri Formatı. 38
Çizelge 3.1: Çalışmada Seçilen IGS Noktaları. 54
Çizelge 3.2: Matlab Programında ALGO İstasyonu için Günlük ve Aylık Verilerden Elde Edilen LSE Sonucu. 60
Çizelge 4.1: Matlab Programında Tüm İstasyonlar için Günlük ve Aylık Verilerden Elde Edilen R^2 Değerleri. 71
Çizelge 4.2: Buzul Etki için Seçilen IGS İstasyonları. 74
Çizelge 4.3: En Küçük Kareler Yönteminden Elde Edilen R^2 Değerleri. 75
Çizelge 4.4: Çalışmada Kullanılan Varsayımların Test Formülleri. 79
Çizelge 4.5: Güven Aralıklarına Göre Test Sonuçları. 80
Çizelge A.1: GPS aktif uydu listesi. 94
Çizelge E.1: Yüzde 90, 95, 99 Güven Aralığına Göre Test Sonuçları. 104

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: GPS, GALILEO ve GLONASS Sistemleri Arasındaki Farklar. Van Sickle (2015)'dan Uyarlanmıştır. 12
Şekil 2.2: GPS Radyo Sinyalleri, NASA (2012)'den Uyarlanmıştır. 15
Şekil 2.3: Hareketli Cismin Uydulara Olan Uzaklığı. 16
Şekil 2.4: GPS Sinyallerinin Evrimi. Hegarty ve diğ, (2017)'den Uyarlanmıştır. 21
Şekil 2.5: IGS Hızlı (IGR) ürünlerinin ağırlıklandırılmış yörünge RMS leri ve IGS Sonuç Yörünge Ürünlerine Göre 1994-2015 yılları arasındaki Analiz Merkezleri Sonuç Ürünleri. Kouba (2009)' dan uyarlanmıştır. 32
Şekil 2.6: Zaman Serilerini Oluşturan Bileşenlerin Grafik Üzerinde Gösterimi. 47
Şekil 3.1: Çalışmada Tercih Edilen IGS Noktalarının Dağılım Haritası. 53
Şekil 3.2: I.Varsayım'ın Temsili Gösterimi. 61
Şekil 3.3: Normal Dağılım Grafiksel Gösterimi. 61
Şekil 3.4: %95 ve %99 Güven Aralıklarına Göre Z Dağılımı. 62
Şekil 3.5: %95 Güven Aralığında Günlük ve Aylık Verilerin Hızlarının Kıyaslanması. 63
Şekil 3.6: II.Varsayım'ın Temsili Gösterimi. 63
Şekil 3.7: III.Varsayım'ın Temsili Gösterimi. 64
Şekil 4.1: ALRT Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 67
Şekil 4.2: BAKE Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 68
Şekil 4.3: BCOV Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 68
Şekil 4.4: CHUR Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 69
Şekil 4.5: DRAG noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 69
Şekil 4.6: HOFN Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 70
Şekil 4.7: HOLM Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 70
Şekil 4.8: Buzul Çekilmesi; a. Buzul dönem b. Geri çekilme dönemi (Courtesy of Tom James at Natural Resources Kanada). 72
Şekil 4.9: Buzul Etki için Seçilen IGS Noktaları ve Sıradan Krigging Yöntemi ile Oluşturulan Harita. 76
Şekil 4.10: Buzul Sonrası Geri çekilme Haritası ile Krigging Yöntemi ile Elde Edilen Haritanın Kıyaslanması (Milne ve Shennan, 2013). 77
Şekil 4.11: Model ve Milne Örneklem Noktalarının Kıyaslanması. 77
Şekil B.1: EKK Matlab Kodu. 95
Şekil C.1: Jeodezik Gps Veri Değerlendirmesi için Tanıtıcı Modüler Şema. 98

Şekil E.1: Varsayım'ın Temsili Gösterimi. 102
Şekil F.1: IQAL Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 106
Şekil F.2: KIRU Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 106
Şekil F.3: NYAL Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 107
Şekil F.4: ONSA Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 107
Şekil F.5: PALM Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 108
Şekil F.6: PETS Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 108
Şekil F.7: QIKI Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 109
Şekil F.8: RESO Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 109
Şekil F.9: SANT Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 110
Şekil F.10: SCOR Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 110
Şekil F.11: THU2 Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 111
Şekil F.12: TR01 Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 111
Şekil F.13: YELL Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 112
Şekil F.14: NAIN Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 112
Şekil F.15: SPT0 Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 113
Şekil F.16: ALGO Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri. 113

DOĞRU HIZ KESTİRİMİ İÇİN AYLIK GPS KAMPANYALARININ PERFORMANSI ÜZERİNE BİR İNCELEME

ÖZET

GPS, birçok alanda kullanıldığı gibi yer yuvarının global deformasyonunun belirlenmesinde de kullanılan bir araçtır. Özellikle tektonik hareketin belirlenmesi, buzul sonrası erimenin izlenmesi ve ITRF'ın sıklaştırılması konularında GPS'ten yararlanılmaktadır. Günümüzde yüksek doğrulukta hız belirleme sürekli GPS ölçümleri ile yapılmaktadır. Sürekli GPS ölçümleri için her zaman sabit GPS istasyonu kurma imkânı olmadığı durumlarda kampanya ölçümlerine başvurulmaktadır. Ancak günümüzde var olan, kampanya ölçümlerinden hız belirleyen GPS prosedürleri yeterli doğrulukta hız üretememektedir.

Bu tezde doğru hız bilgisi üreten GPS kampanya ölçüm ve değerlendirme yöntemleri geliştirilerek, GPS ölçümleri yardımıyla tektonik hareket izlenmiştir. Bu doğrultuda, 1995-2017 yılları arasında 22 yıllık bir zaman dilimini kapsayacak şekilde-yükseklik bileşenine ait yer değiştirme-zaman ilişkisinin R^2'si 0,85'ten büyük 24 adet IGS noktası (PALM, ALRT, BAKE, HOFN, HOLM, IQAL, NYAL, PETS, QIKI, RESO, SCOR, THU2, TRO1, AIRA, CHUR, DRAG, SANT, YELL, SPT0, ONSA, NAIN, KIRU, ALGO, BCOV) seçilmiştir.

Bahse konu istasyonların, JPL tarafından GIPSY yazılımı ile analize tabi tutularak türetilen 24 saat oturum süreli GPS baz bileşenlerine ait (doğu, kuzey, düşey) günlük/sürekli zaman serisi elde edilmiştir. Sonrasında, günlük zaman serileri her ayın birinci günü alınarak seyreltilmiş ve aylık/kampanya verisi elde edilmiştir. Sürekli zaman serileri ve kampanya zaman serilerine ait yatay ve düşey hız bilgisi üretilmesinde 1 yıllık ve 6 aylık mevsimsel etki göz önüne alınmış olup, kullanılan matematiksel modelde bilinmeyenler "En Küçük Kareler Yöntemi" ile Matlab R2013a programı aracılığıyla çözülmüştür.

Tez çalışması sürecinde, düşey bileşende yer değiştirme-zaman ilişkisinde gözlenen eğilim ile buzul sonrası geri çekilmeden kaynaklı kabuk yükselişi arasında bir korelasyon olabileceği araştırılmış, literatür taramaları ile sonuçlar desteklenmiştir.

Son olarak, kestirilen günlük ve aylık verinin deformasyon oranları 4 farklı varsayıma göre istatistiksel test kullanılarak karşılaştırılmıştır. Diğer bir ifadeyle, ayda bir örneklemeli 24 saat ölçümlü GPS kampanyalarından elde edilen hızlar, doğru olarak kabul edilen ve JPL'den elde edilen sürekli GPS hızlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. GPS kampanya süresinin 8-12 saatten 24 saate çıkarılması ve yüksek R^2'li (1'e yakın) istasyonlar ile çalışılması sonucunda kampanya GPS ölçümlerinden kestirilen hızların (günlük örneklemeli) sürekli GPS zaman serilerinden elde edilen hızları ile istatistiksel anlamda %95 üzerinde uyuştuğu görülmüştür.

AN INVESTIGATION ON THE PERFORMANCE OF MONTHLY GPS CAMPAIGNS FOR SPEED ESTIMATION

SUMMARY

From the first ages of humanity, the shape and dimension of the world has been a subject that attracts the curiosity of mankind. Geodetic science emerged by recognizing this need. Geodesy is a branch of science in the three-dimensional coordinate system, which is used to describe the time-dependent changes in the field of gravitational field, shape and size. This branch of science is examined under two headings. The methods applied until the invention of satellite technology are called classical geodesy and the next developments are named as modern geodesy (satellite geodesy). While the shape of the world can be determined approximately by the methods of measurement called classical geodesy, it was not possible to carry out studies about the change of this shape over time. In particular, the concept of time was integrated into the calculations by means of satellite geodesy. The pioneering methods of satellite geodesy, especially GPS, have created new possibilities and targets that have not yet been achieved by classical geodetic methods and have provided these targets with a fast, efficient and economical way to access.

GPS is a tool that is used in many areas as well as to detect the global earth deformation. In particular, GPS is used for determination of tectonic movements, monitoring of post-glacial rebound and realization of ITRF.

Today, high accuracy speed measurements are done by continuous GPS measurements. Campaign method is used when there is not always the possibility to set up a fixed GPS station for continuous GPS measurements. However, today's GPS procedures that measure speed from campaign measurements do not generate speed data with adequate accuracy.

In this thesis, GPS campaign measurement and evaluation methods, which produce accurate speed data for tectonic movement were developed and the motion was monitored by the help of GPS measurements.

In this context, 24 IGS monitoring points (PALM, ALRT, BAKE, HOFN, HOLM, IQAL, NYAL, PETS, QIKI, RESO, SCOR, THU2, TRO1, AIRA, CHUR, DRAG, SANT, YELL, SPT0, ONSA, NAIN, KIRU, ALGO, BCOV) that have greater R2 value than 0,85 for the vertical (up) components of the displacement-time relationship were analysed over a 22-year span between 1995-2017.

A 24-hour session of daily/continuous time series of GPS base components (east, north, up) analysed by JPL with the help of GIPSY program was used in this study. Monthly / campaign data was obtained by sampling the first day of each month of daily time series.

The seasonal effect of one year and six months were taken into consideration when generating of horizontal and vertical velocity component data of continuous and

campaign time series. By the help of Matlab R2013a program, unknown parameters in the mathematical model were solved with least squares method.

Speed data obtained from the GPS campaigns, which are sampled 24 hours a month were compared with the continuous GPS speeds obtained from JPL (that accepted as true) and then, the results are interpreted by using confidence intervals. The deformation rates of daily and monthly data were compared by using three different statistical tests. These tests are differ according to the variance is known and unknown, whether the data are obtained in the same or in different sample space.

The confidence intervals (Z_{90} = 1,645, Z_{95} = 1,96, Z_{99} = 2,58) of statistical tests determines if the deformations were within the acceptable range.

According to the Z_{90} = 1,645 confidence interval; the comparison of campaign data with the continuous data of the AIRA station vertical component and DRAG and NYAL stations latitude component was inconsistent according to the three assumptions. The comparison of campaign data with the continuous data of the AIRA station latitude and longitude components, DRAG station latitude and vertical components, NYAL station longitude and vertical components and ALGO, ALRT, BAKE, BCOV, CHUR, HOFN, HOLM, IQAL, KIRU, NAIN, ONSA, PALM, PETS, QIKI, RESO, SANT, SCOR, SPTO, THU2, TRO1 and YELL stations all components were consistent according to three assumptions. According to the statistical test results, it was found that 96% of the vertical velocity component obtained from the campaign measurements was consistent with the velocity obtained from the continuous data. Similarly, 92% of the horizontal velocity component obtained from the campaign measurements was consistent with the horizontal component velocity obtained from the continuous data.

For Z_{95} = 1.96 confidence interval; the vertical component of the AIRA station and the longitude component of the DRAG station and latitude component of the NYAL station were incompatible according to three assumptions. The latitude and longitude component of AIRA station, the latitude and vertical component of DRAG station and all components of ALGO, ALRT, BAKE, BCOV, CHUR, HOFN, HOLM, IQAL, KIRU, NAIN, NYAL, ONSA, PALM, PETS, QIKI, RESO, SANT, SCOR, SPTO, THU2, TRO1, YELL were compatible with 3 assumptions. According to the statistical test results, it was found that 96% of the vertical velocity component obtained from the campaign measurements was consistent with the velocity obtained from the continuous data. Similarly, it was found that 96% of the horizontal velocity component obtained from the campaign measurements was consistent with the horizontal component velocity obtained from the continuous data.

For Z_{99} = 2.58 confidence interval; the comparison of campaign data with the continuous data of the AIRA, ALGO, ALRT, BAKE, BCOV, CHUR, DRAG, HOFN, HOLM, IQAL, KIRU, NAIN, NYAL, ONSA, PALM, PETS, QIKI, RESO, SANT, SCOR, SPTO, THU2, TRO1, YELL all components were compatible with the 3 assumptions. According to the statistical test results, it was found that 100% of the vertical speed component obtained from the campaign measurements was consistent with the speed obtained from continuous data. Similarly, it was found that 100% of the horizontal velocity component obtained from the campaign measurements were consistent with the horizontal component velocity obtained from continuous data.

As a result of working with stations with high R^2 value (close to 1), it was observed that the estimated speeds of the campaign GPS measurements were 95% statistically

consistent with the speeds obtained from the continuous GPS time series (daily sampling).

Also, the possible correlation between trend of vertical displacement and crustal rise after glacier withdrawal was also investigated. The results were confirmed by checking with related studies. In this direction, position time series of 34 IGS geodynamics stations with 24-hours period of 1995-2017 were used. By using the Matlab, R^2 of vertical velocities were obtained by the least squares method. After this process, R^2 values were geospatially modelled around the World by using geostatistical technique named as "ordinary kriging" with ArcGIS program. According to constructed map, continents of South America, Northern Europe and Antarctica, where were affected by glacial retreat, had R^2 values close to 1.

To verify the results, the generated map and Milne and Shennan's glacial isostatic adjustment model map were compared by using Geo-referencing Method in ArcGIS program. Glacial retreat rates of 34 IGS points were overlapped with the values in the map.

The results revealed us that the post glacial rebound rates appears to be 88% well-matched with the R^2 values. The model proved that the IGS stations which have high R^2 values for velocity component was compatible with post glacial rebound in the study of Milne and Shennan. This result showed that it is possible to detect and investigate glacial effects in any region on the Earth with monitoring only vertical speed.

Despite glacial movements modelling is widely used subject among researchers, the withdrawal effect of glaciers cannot be easily forecasted still. Modelling simple is always a good choice for accurate modelling. With low effort and cost, modellers have a chance to investigate the post glacial rebound effect thanks to this basic study. As a result of this study, it has been shown that the deformation of tectonic movement and melting after post glacial effect can be analysed as close to continuous observations with monthly campaigns.

To sum up, different from other studies, the extension of the observation period to 24 hours provided that risen of estimation accuracy of Horizontal speed from 30-40 percent to 100 levels. Besides, estimation accuracy of vertical speed were increased to 95% level from zero degrees. Campaign observations once a month play an important role in determining the vertical signal. But it will bring heavy costs, labour and time loss to the observer. For this reason, the frequency of campaign measurements should be studied in future studies and the effect of this on speed estimation accuracy should be examined separately.

1. GİRİŞ

İnsanlığın ilk çağlarından itibaren dünyanın şekli ve boyutu insanoğlunun merakını cezbeden bir konu olmuştur. Ancak bilimsel ve teknolojik eksiklikler bu merakın giderilmesinin önündeki engeller olmuştur. Jeodezi bilimi bu ihtiyacın fark edilmesiyle ortaya çıkmıştır. Jeodezi, üç boyutlu koordinat sisteminde yer yuvarı çekim alanının, şeklinin ve boyutunun zamana bağlı değişimlerini tanımlamaya yarayan bir bilim dalıdır.

Geçmişte, jeodezik çalışmalarda "klasik ölçme yöntemleri" adı verilen parçalı yersel ölçme teknikleri kullanılmıştır. Klasik jeodezide, konum belirleme kavramı iki kısım halinde elde edilebilmektedir. Bunlardan ilki, seçilen bir referans yüzeyi üzerinde bu yüzeye indirgenmiş gözlemler yardımıyla konum bilgilerinin iki boyutlu hesaplanması, ikincisi de ilgili noktanın söz konusu referans yüzeyine olan uzaklığının belirlenmesidir. Bu iki hesaplamanın birbirinden bağımsız olarak ayrı ayrı değerlendirilmesi, söz konusu yöntemin üç boyutlu olmasını engellemektedir. Ölçme alet ve yöntemlerinin gelişmesi, teknolojideki gelişimler, geometrik verilerin yanında fiziksel kavramlarında hesaba katılmasını gerektirmiş, bu da hesaplamalara yeni boyutların katılmasını sağlamıştır. Parçalı olarak nitelendirilen klasik yaklaşımın yerini üç boyutlu, hatta zaman kavramının da göz önüne alınmasıyla dördüncü boyutu da ele alan entegre yaklaşımlar almıştır. Aslında, yatay ve düşey kontrol ağlarının aynı matematiksel model altında değerlendirilmesi 1800'lü yılların sonlarında Bruns tarafından önerilmiştir. Ancak uygulamaya geçişi Global Konum Belirleme Sistemi'nin (GPS) keşfi ile mümkün olabilmiştir. Bu değişim ve gelişmeler sonucunda uydu teknolojisine kadar uygulanan yöntemler klasik jeodezi, bundan sonraki görüşler ise modern jeodezi (uydu jeodezisi) olarak isimlendirilmektedir (Atasoy, 1991; Kurt, 2013).

Klasik arazi ölçmeleri sadece kıtaların büyüklüğü ile sınırlı olduğundan klasik jeodezik çağda dünyanın şeklinin karakteri yaklaşık olarak belirlenebilirken, söz konusu şeklin zamanla değişimi ile ilgili çalışmalar yapılamamıştır. Bilimsel olarak yaklaşmak gerekirse, uydu teknolojisi kullanılmadan; kıtaların okyanuslar üzerinden

birbirlerine ağlarla bağlanabilmesinin uygulanabilir olmadığı gerçeği göz önüne çıkmaktadır. Pratik uygulamalarda ise, ülkeler ulusal ağlarında koordinat tanımlaması yapabilmek için kurallar geliştirmişlerdir. Bu durum, ülkelerin birbirinden farklı ulusal referans sistemine sahip olması ile sonuçlanmıştır (Blewitt, 2015).

Uydu jeodezisinin öncü metotları, klasik jeodezik yöntemlerle şimdiye kadar erişilemeyen yeni olanaklar ve hedefler ortaya çıkarmış ve bu hedeflere hızlı, verimli ve ekonomik yoldan erişme imkânı sağlamıştır (DPT, 2001). Uydu teknolojileri, global çapta kuruluş ve kullanıcılara hizmet veren, özellikle cep telefonlarının akıllanmasıyla, modern dünyanın vazgeçilmez donanımları haline gelmiştir. Bu teknolojilerin bir ürünü olarak, global konum belirleme fikri Amerikan askeri birliklerini denizaşırı sahalarda koordine edebilmek için ortaya atılmış ve 1990'lardan itibaren bu teknoloji araştırmacıların ve sivillerin kullanımına açılmıştır. Çok boyutlu olan söz konusu sistem, kıta hareketlerinin belirlenmesi, ülke jeodezik ağlarının yenilenmesi gibi çok farklı alanlarda araştırmacılar tarafından değerlendirilmiştir (Telli ve diğ, 2009).

Jeodezik GPS ölçmeleriyle belirli bir zaman içindeki yer hareketleri, uzun bir zaman diliminde sürekli gözlem yapılabilmesi amacıyla tasarlanan kontrol ağı şeklinde veya periyodik olarak tekrarlanan kampanya tipi gözlemler ile hesaplanabilmektedir. Özellikle tektonik hareketlerin izlenmesinde kullanılan bu ölçmeler teknolojinin ilerlemesiyle daha da yaygınlaşmıştır. Ülkemizde 1990'lı yılların başlarında 10-15 noktalı kurulan tektonik ağların yerini, günümüzde 50-60 noktalı ve sürekli gözlem yapan ağlar almıştır (Tiryakioğlu, 2012). Bu iki gözlem yönteminden hangisinin tercih edileceği kullanım alanlarındaki ihtiyaca göre belirlenmektedir.

Jeodezik ve jeodinamik amaçlar doğrultusunda, askeri ve sivil kullanıma yönelik uydu bilgileri, dünya üzerine dağılmış Sabit GPS istasyonları sayesinde yılın her günü ve her saatinde kesintisiz olarak toplanmaktadır. Bu sayede yer kabuğu hareketlerine yönelik kinematik modelleme çalışmaları hayata geçirilebilmektedir. Zaman ilerledikçe kaydedilen veri sayısı artmış, artan örneklemler ile hata, gürültü özellikleri ve periyodik etkilerin analizi, uzun zaman serilerinin kullanılmasıyla mümkün hale gelmiştir.

Sabit GPS istasyonu kurma imkânı olmayan çalışmalar için genellikle belirli aralıklarla gerçekleştirilen kampanya ölçümlerine başvurulmaktadır. Bahse konu GPS

kampanyaları değerlendirilerek hız vektörleri elde edilmekte ve bölgedeki kıtasal hareketler hakkında fikir sahibi olunabilmektedir (Baysal ve diğ, 2010). Tasarım açısından esnek ve düşük maliyetli olan GPS kampanya ölçüm yöntemleri, yer değişimlerini hassas bir zaman aralığında verememektedir. Bu durum yavaş değişimli ve sabit inter-sismik deformasyonların incelenmesinde problem yaratmasa da kampanya aralıklarından daha büyük frekansa sahip değişimlerin tespit edilmesinde sorun çıkarmaktadır.

Özetlemek gerekirse bölgesel deformasyon hakkında sabit GPS istasyonlarından elde edilen verilerle düşük çözünürlüklü yüksek frekansta bilgi toplanırken, kampanya tipi ölçülerle daha yüksek çözünürlüklü ve düşük frekansta bilgi toplanmaktadır. Yüzey deformasyonları ve doğrusal tektonik hızın daha doğru ve gerçeğe yakın hesaplanabilmesi Sabit GPS istasyonlarından elde edilen verinin analizi ile kampanya tipi ölçüm yöntemlerinin geliştirilmesi ile mümkün olabilmektedir. Söz konusu sabit GPS istasyonlarından elde edilen zaman serilerindeki hatalar, kampanya tipi GPS ölçmeleri ile elde edilen ölçmelerin hatalarıyla benzerlikler göstermektedir (Kurt ve Deniz, 2010).

GPS kampanyalarının etkin kullanımı hakkında yapılan çalışmalar farklı doğruluk seviyelerinde hassas uydu yörünge ve saat bilgileri üreterek, veri ve ürünlerini kullanıcılara sunan başta Uluslararası GNSS Servisi (*International GNSS Service*, IGS) olmak üzere pek çok kuruluşun kurulmasıyla birlikte ivme kazanmıştır. Trần ve diğ. (2013) Kuzey Vietnam'da yer alan kırmızı nehir fay sisteminin hareket eğilimini belirleyebilmek amacı ile SOPAC (*Scripps Orbit and Permanent Array Center*) tarafından sağlanan IGS ürünleri[1] ile GPS kampanya çalışması yapmıştır. Bu çalışma ile 1994 ve 2007 yılları arasında Kuzey Vietnam'daki 27 istasyondan toplanan verilerle fay bölgelerinin birbirine göre hareketi karşılaştırılmıştır. Rontogianni (2010) çalışmasında 1994 ve 2000 yılları aralığında düzenli GPS ölçüm kampanyaları ile Yunanistan'daki jeodezik ve sismik gerilimi karşılaştırmıştır. Ashurkov ve diğ. (2011) tabaka sınırlarının jeomeorfolojik açıdan belirsiz olduğu Amurian levhasında yer kabuğu hareketlerini izleyebilmek için GPS kampanya ölçümlerinden faydalanmıştır. Litosferik levhanın hareket karakteristiği 2000-2007 yılları arasındaki yatay hız GPS

[1] IGS ürünleri: Hassas yörünge, ITRF de IGS istasyonlarının hassas koordinatları ve hızları olarak tanımlanmaktadır.

ölçümlerinin modellenmesi ile elde edilmiştir. Catalão ve diğ. (2011) sadece uydu bakış doğrultusunda bilgi veren Interferometik Yapay Açıklıklı Radar (*Interferometric Synthetic Aperture Radar,* InSAR) verisini atmosferik olarak düzeltilmiş biçimde, yatay yönde daha doğru sonuçlar veren tekrarlı GPS ölçüm verisi ile birleştirerek yer değiştirme hızını haritalamak üzerine bir çalışma yapmıştır. Elliot ve diğ. (2010) Avrasya ve Afrika levhalar arası hareketi ve Terceira yarığı boyunca volkanik hareketlerden kaynaklanan yer değiştirme miktarını belirlemek amacıyla 17 istasyon ile 1999-2006 yılları arasında GPS kampanya ölçmelerini kullanılmıştır.

Ülkemizde de sabit GPS ve kampanya ölçümlerini konu alan örnek çalışmalar bulunmaktadır. Akarsu (2012), GPS statik ölçme yöntemiyle elde edilen verilerin gözlem süresinin IGS nokta hızları doğruluğu üzerindeki etkisini çalışmıştır. Yükseklik ve yatay bileşenler için en ideal gözlem sürelerini belirlemek için Sanli ve Kurumahmut (2011) ile Hastaoğlu ve Sanli (2011a) tarafından çalışmalar yapılmıştır. GPS statik konum doğruluğuna yönelik diğer çalışmalar ise Eckl ve diğ. (2001), Sanli ve Engin (2009) ve Sanli ve Tekic (2010) tarafından yapılmıştır. Hastaoğlu ve Sanli (2011b) bir başka çalışmada hızlı statik GPS hızları için en ideal süreyi belirlemişlerdir. Akarsu ve diğ. (2015) 24 saatlik kampanyalardan elde edilen hız değerleri ile 8 ve 12 saat gibi daha kısa süreli ölçüm kampanyalarından elde edilen hızları karşılaştırmış ve bu değerlerin birbirinden istatistiksel olarak anlamlı derecede fark ettiğini bulmuştur.

Sabit GPS istasyonları ve kampanya ölçümlerinden birçok çalışmada yararlanıldığı gibi Buzul İzostatik Dengeleme (*Glacial Isostatic Adjustment*, GIA) çalışmalarında da kullanılmıştır. Geçmişten bugüne önde gelen araştırmacılar tarafından birçok GIA modeli geliştirilmiştir. Peltier ve Andrews (1976) sonlu elemanlar analizi ve sayısal analiz çözümlerinin geliştirilmesinde deniz seviyesi tahmin teorisi ile GIA modeli çalışmalarına öncülük etmektedir. Shennan ve Milne benzer bir çalışmayı 2013 yılında tamamlayarak, deniz seviyesini yüksek doğruluk oranları ile tahmin edebilmektedir. Lambeck ve diğ, (1998) kıyı şeridi hesapları ile deniz seviyesi değişikliklerini hesaplama modeli geliştirirken okyanus ve buzul etki yüklerini de göz önüne almıştır. Wu ve diğ. (2005) Dünya yapısı ve jeoloji ile sonlu elemanlar tekniği kullanarak izostatik deformasyon ve deniz seviyesi ilişkisini modellemiştir. Kaufmann ve Lambeck (2000) Dünya kabuğunun viskozitesini tahmin etmek için GIA modeli kullanmıştır. Potsdam'daki Alman Jeoloji Araştırma Merkezi, spektral sonlu

farklılıkların gelişimine öncülük etmiştir. Yüzey yükünün 3-D viskozite yapısını hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemleri kullanılarak toprağın viskoelastik tepkisi araştırılmıştır. Ek olarak, Zhong ve diğ. (2003) buzul sonrası geri tepme analizini yapmış, sonlu eleman modelini kullanarak viskoz manto konveksiyon problemlerini incelemiştir. Gasperini ve Sabadini (1990) ve Giunchi ve diğ. (1997) GIA'nın yer kabuğunun yan yapısı üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Vermeersen ve diğ. (1996) yüzey yükünden dolayı yer kabuğunda viskoelastik gevşeme için "Analitik Normal Mod" metodunu geliştirmiştir. Fjeldskaar (1997) yüzey yüklemesine karşı yükleme tepkisini hesaplamak için gerçekçi bir buzul erime modeli ile fourier dönüşüm yöntemi ile elastik litosfer ile kaplanmış viskoz bir mantodan oluşan basit yarım uzay modeli kullanmıştır.

Bu çalışmada doğru hız kestirimi için aylık GPS kampanyalarının performansı üzerine bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda ayda bir örneklenmiş 24 saatlik GPS kampanyalarından elde edilen hızlar, doğru olarak kabul edilen ve Jet İtki Laboratuvarı'ndan (*Jet Propulsion Laboratory*, JPL) elde edilen sürekli ya da başka bir deyişle günlük örneklenmiş GPS hızlarıyla karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde tez çalışmasına kavramsal bir çerçeve oluşturulması amacıyla GPS ve diğer global uydu konum belirleme sistemleri incelenmiştir. Çalışmada kullanılan verinin elde edildiği IGS kuruluşu tanıtılmış, ürünleri ve elde edilme aşamaları anlatılmıştır. GPS ölçmelerinin modellemesi ve zaman serileri anlatılmış, yıllık sinyallerin jeodezik hız üzerindeki etkisi vurgulanmıştır.

Üçüncü bölümde ise tezin şeklini almasını sağlayan materyal ve metottan bahsedilmiştir. Çalışmada kullanılan veri örneklemi ve IGS istasyon seçim kriterleri özetlenmiştir. Seçilen istasyonların hızlarının doğru kestirilebilmesi için kullanılan matematiksel model üstünde durulmuş, kullanılan çoklu lineer regresyon analizi ve En Küçük Kareler (EKK) yöntemi anlatılmıştır. Ayrıca, çoklu lineer regresyon ile elde edilen günlük ve aylık verinin deformasyon oranları arasındaki farkın anlamlılığının test edildiği istatistiksel metotlar özetlenmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde IGS istasyonlarının hız kestirimi ile istatistiki değerlerin sonuçları sunulmuştur. Buna ek olarak, düşey bileşende gözlenen trendin buzul geri çekilmeden kaynaklı kabuk yükselişinden meydana gelip gelmediği GPS

kampanya ölçüm değerlendirme yöntemlerinden elde edilen hız vektörleri kullanılarak araştırılmış ve sonuçlarına yer verilmiştir.

Çalışmanın sonuç kısmında günlük ve aylık deformasyon oranlarının kabul edilebilir güven aralıklarında (Z_{90}=1,645, Z_{95} =1,96, Z_{99} =2,58) olması incelenmiştir. Bu kapsamda deformasyon oranı doğruluğunun %95 üzerinde ve arzu edilen istatistiksel güven düzeyi kapsamında olduğu sonucuna varılmıştır. Buzul geri çekilmenin izlendiği ek çalışmada ise; buzul sonrası geri çekilmeden etkilendiği bilimsel olarak ispatlanan bölgelerde yer alan istasyonların doğu, kuzey hız bileşenlerinin yanında düşey hız bileşenlerinin R^2'nin de yüksek olduğu ortaya konmuştur. GIA sonucu kabukta meydana gelen yükselmenin, kampanya GPS gözlemleri ile sürekli gözlemlerden elde edilen orijinaline yakın bir kalitede elde edilebildiği gösterilmiştir. Bu çalışma ile sürekli gözlem yerine, periyodik aralıklarla ölçüm yapılmasının; zaman, maliyet ve emek tasarrufunu sağlayacağı düşünülmektedir. İleride yapılacak çalışmalarda gelişmekte olan uzay teknolojisi ile birlikte; daha az oturum süreli ölçüler ile günlük veriden elde edilen GPS hızlarının uyumu araştırılabilir, aylık kampanya veri sıklığının daha da azaltıldığı çalışmalar gerçekleştirilebilir.

2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 GNSS Sistemleri

Dünya'nın ilk yapay uydusu SPUTNIK-1'in Sovyet Sosyalist Cumhuriyeti Birliği (SSCB) tarafından uzaya fırlatıldığı tarih olan 4 Ekim 1957 global konum belirleme sistemlerinin başlangıcı olarak kabul edilmektedir. SSCB ve Amerika Birleşik Devletleri (ABD) arasında yaşanan dünyanın süper gücü olma çabası uydu teknolojisinde elde edilen gelişmeleri ivmelendirmiştir. Bu rekabette geride kalmak istemeyen ABD, Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (*National Aeronautics and Space Administration*, NASA) ve Jet İtki Laboratuvarı (*Jet Propulsion Laboratory*, JPL) gibi birçok bilimsel çalışma yapan kurumunu destekleyerek yarışa ortak olmak istemiştir. Bunun sonucunda 1958 yılında Explorer I adlı ilk uydusunu dünyanın yörüngesine göndererek uzay arenasında SSCB'ye karşı ilk hamlesini yapmıştır. Özellikle konum belirleme sisteminde öne geçmek isteyen ABD bu çalışmaları bilimsel çalışma olmanın ötesinde birer milli dava olarak kabul etmiştir. Bu sayede uzay konusuna yapılan yatırımlar sadece devlet tarafından değil tüm halk tarafından sahiplenilmiştir. Bunun en güzel örneği olarak dünyanın yörüngesine erişmeyi başaran John Glenn'in ABD'de kahraman ilan edilerek kendisine dönemin ABD Başkanı John Kennedy tarafından Onur Madalyası verilmesi gösterilebilir. Bu rekabet sayesinde GPS ve GLONASS gibi birçok buluş ve teknolojik aracın ortaya çıkması sağlanmıştır. Çalışmada ilk olarak öncü olarak kabul edilen GPS sisteminin gelişimi, daha sonra GLONASS, GALILEO, Beidou/COMPASS, QZSS ve IRNSS gibi diğer GNSS sistemlerinden bahsedilmiştir.

2.1.1 GPS

Konumlandırma sistemlerinde yapılan ilerlemelerin başlangıcı olarak, uydunun radyo sinyallerini izleyen bir grup Amerikalı bilim adamı tarafından, uydu yaklaşırken uydu sinyalinin daha yüksek, uzaklaşırken sinyalin daha düşük olduğunun fark edilmesi, kabul edilebilir. Bu durum, yeryüzündeki sabit noktanın konumu bilindiği takdirde

uydunun kesin konumunun Doppler[2] bozunumu/ötelemesinin ölçülerek bulunabileceğini ortaya çıkarmıştır. Bu tarihten itibaren jeodezik uydular tarafından yeryüzü çekim alanı parametrelerinin bulunması ve hassaslaştırılması için kullanılan optik metotlar yerini Doppler metoduna bırakmıştır.

ABD Donanması TRANSIT isimli uydu navigasyon sistemini 1960 yılında başarılı şekilde ilk defa test etmiştir. Bahse konu sistem dünya etrafında yörüngede dolanan beş uydudan oluşmakta olup, sistemin bir saatten önce navigasyon konumu verememesi sistemin en önemli kusuru olarak kabul edilmektedir. GPS'in etkin kullanılabilmesi için uzayda güvenilir doğrulukta saatlere ihtiyaç olduğu farkedilmiş, bu ihtiyacın giderilmesi için 1967 yılında Timation uydusu fırlatılmıştır. 1970'lerde ise dünya çapında ilk yer bazlı navigasyon sistemi olan "Omega Navigasyon Sistemi" faz karşılaştırma esasına göre çalışmaya başlamıştır (Blewitt, 2015; Mekik, 2010; NASA, 2012; Hofmann-Wellenhof ve diğ, 2007).

1970'lerin başlarında, Dünya Jeodezik Sistemi 1972 (*World Geodetic System 1972* - WGS 72) ile sonrasında geliştirilen Dünya Jeodezik Sistemi 1984 (*World Geodetic System 1984* - WGS 84) global referans çerçevesi öncülüğünde, 10 m doğrulukla ve global ölçekte Doppler ile konum belirleme olanaklı hale gelmiştir. 1970'lerin sonlarında ise global ağın bilinen koordinatlara sahip olması ve izleme yöntemlerinin başarısı prototip GPS'in gelişimini hazırlamıştır.

Deneysel GPS uyduları Blok I adı altında 1978 yılında fırlatılmış olup, 1985 yılına kadar bu uyduları on uydu daha izlemiştir. Bu yatırımlar çok frekanslı taşıyıcı faz gözlemi yapan prototip jeodezik GPS veri değerlendirme yazılımlarının test edilmesi ve gelişmesinin sağlanmasına olanak vermiştir. İlk yıllarda; uzun mesafelerdeki belirsizlik çözümü, hassas yörünge belirleme, troposfer modellemesi gibi önemli gelişmeler söz konusu araştırmalar ve yatırımlar neticesinde elde edilmiştir. 1989 Şubat'ında ise ilk tam ölçekli Blok II olarak bilinen operasyonel GPS uyduları fırlatılmaya başlanmıştır. Ocak 1994 yılında ise yörüngede dolanan tam operasyonel kapasitede 24 uydu sayısına ulaşılmıştır (Blewitt, 2015; Mekik, 2010; NASA, 2012; Hofmann-Wellenhof ve diğ, 2007).

[2] Dalga özelliği gösteren herhangi bir fiziksel varlığın frekans ve dalga boyunun hareketli (yakınlaşan veya uzaklaşan) bir gözlemci tarafından farklı zaman veya konumlarda farklı algılanması olayıdır.

GPS'in başlangıç operasyonel kapasitesi kurumsal olarak 1993 Aralık ayında, tüm operasyonel kapasite ise 1995 Nisan ayında ilan edilmiştir. 1997 Temmuz ayından itibaren bu uydular, Block IIR-s GPS uyduları ile yer değiştirmeye başlamış, 2005 yılında ise modifiye edilerek Block IIR-M[3] olarak faaliyete geçirilmiştir.

Uydu topluluğu, yeryüzündeki kullanıcının her zaman ve her yerde en az dört uydu görebilmesi üzerine kurulmuştur. Bu amaçla 24 GPS uydusu nominal olarak 6 yörünge düzlemine oturtulmuştur. 2018 yılı itibarıyla kullanılmakta olan 31 uydu takımı, uydularda meydana gelebilecek hatalarda kesintisiz ve hızlı bir iyileşmenin sağlanması amacıyla "aktif yedek" olarak kullanılmak üzere yedek uyduları içermektedir. Bahse konu uydular Blok II, Blok IIA, Blok IIR ve Blok IIR-M & F şeklinde fırlatılma dönemlerine göre sınıflandırılmıştır (Çizelge 2.1). Aktif çalışan uydular ile ilgili detaylı bilgi Ek A'da yer almakta olan çizelgede sunulmuştur.

Çizelge 2.1: Fırlatılma Yıllarına Göre Uydu Blokları ve Sayıları. Navigation Center (2018)'den Uyarlanmıştır.

Blok	Fırlatılma Periyodu	Uydunun Fırlatılması				Yörüngede
		Başarılı	Başarısız	Hazırlık	Planlanan	
I	1978–1985	10	1	0	0	0
II	1989–1990	9	0	0	0	0
IIA	1990–1997	19	0	0	0	0
IIR	1997–2004	12	1	0	0	12
IIR-M	2005–2009	8	0	0	0	7
IIF	2010–2016	12	0	0	0	12
IIIA	2017 sonrası	0	0	0	12	0
IIIB	—	0	0	0	8	0
IIIC	—	0	0	0	16	0
	Toplam	70	2	0	36	31

GPS'in başarısı benzer GNSS sistemlerinin yol almasında motivasyon sağlamıştır. Küresel kapsamayı sağlayabilmek amacıyla her GNSS sisteminin kabaca 12 saat yörüngelerinde 20 - 30 uydu takımına sahip olması gerekmektedir (Blewit, 2015).

[3] ilk defa L2C sinyali yayımlayarak sivil kullanıcılara iyonosferik gecikmenin kalibre olmasını sağlayan uydu.

2.1.2 GLONASS

İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra devletler soğuk savaş döneminde birbirlerine, sahip oldukları silah teknolojileri ile üstünlük sağlamaya çalışmıştır. ABD'nin silah ve uzay teknolojisinde attığı adımlar SSCB'yi de bu alana girmeye zorlamış, kendilerine ait global konum belirleme sistemi 1980'li yılların başlarında tasarlanmış ve GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*) adı verilen bu sistemin ilk uydusu 12 Ekim 1982 yılında fırlatılmıştır. Ancak SSCB'nin dağılması ile sistemin uygulanışı 1990'lı yılların ortasına kadar askıya alınmıştır. SSCB'den sonra kurulan Rusya, global konum belirleme sistemini GPS'e paralel olarak geliştirilmiş ve 1995 yılında 24 uydusuyla birlikte yeryuvarını tamamen kapsamayı başarmıştır. Fakat bu başarı kısa ömürlü tasarlanan uydular ve Rus ekonomisinin çöküşü sebebiyle devam edememiş, 2002 yılında sistem birkaç uyduya kadar düşmüştür (Van Sickle, 2015; Mekik, 2010; Kaplan ve Hegarty, 2005).

2001 yılında Rusya devlet başkanı Putin'in, Batılı teknolojilere rakip Rus teknolojilerinin gelişmesi gerektiğine vurgu yapmasıyla GLONASS yeniden hayata dönmüştür. Putin'in talimatıyla 2007 yılında GLONASS halkın kullanımına açılmıştır. 2008'de ise Rusların uydu ağını genişletmesi ile birlikte GLONASS artık dünya çapında kullanılabilen bir sisteme dönüşmüştür. 2011 yılının sonunda 24 uydu takımı tamamlanmış ve 2013 yılı itibariyle yörüngede 29 uydu bulunmaktadır (Alçay ve İnal, 2010; Chip Dergisi, 2015).

GLONASS ve diğer sistemler arasındaki farklar, benzerlikler:

- Birçok modern GNSS alıcısı GPS ve GLONASS'ı izleyebilir. GPS gibi, GLONASS uydu yörüngeleri ve saatleri IGS tarafından modellenebilir. Fakat GLONASS uydularının taşıyıcı faz çözünürlüğü tekniğini engelleyen, farklı iletim frekanslarından dolayı sistem GPS kadar yüksek duyarlılığa sahip değildir. Bununla beraber, GLONASS verisi kentsel, kanyon ortamı gibi gökyüzünün tamamıyla gözükmediği yerlerde GPS'i destekler (Alçay ve İnal, 2010; Chip Dergisi, 2015).
- GLONASS'ta her uydunun kendine ait bir frekansı ve farklı olmayan kodu vardır. GPS'te her uydunun farklı kodları ve ortak frekansları vardır (Mekik, 2010; Blewitt, 2015).

- GLONASS, Frekans Bölüşümlü Çoklu Erişim[4] (FDMA) kullanırken GPS ve Galileo, Kod Bölüşümlü Çoklu Erişim (CDMA) kullanmaktadır.

2.1.3 GALILEO

2020'den önce 30 uydusuyla birlikte tam operasyonel kabiliyetini göstermesi planlanan Galileo, Avrupa'ya ait olan ve GPS sistemine alternatif olarak tasarlanmış global konum belirleme sistemidir. Galileo için, 26 Mart 2002 tarihindeki Avrupa Ulaştırma Bakanları Kurulu toplantısında 450 Milyon avro'luk bir bütçe ayrılmıştır. Sistem, 2000 yılında tasarlanmış ve uydu geliştirilmesi, yer istasyonları ile altyapı tesislerinin oluşturulması ve test çalışmaları 2002–2005 yılları arasında yapılmıştır.

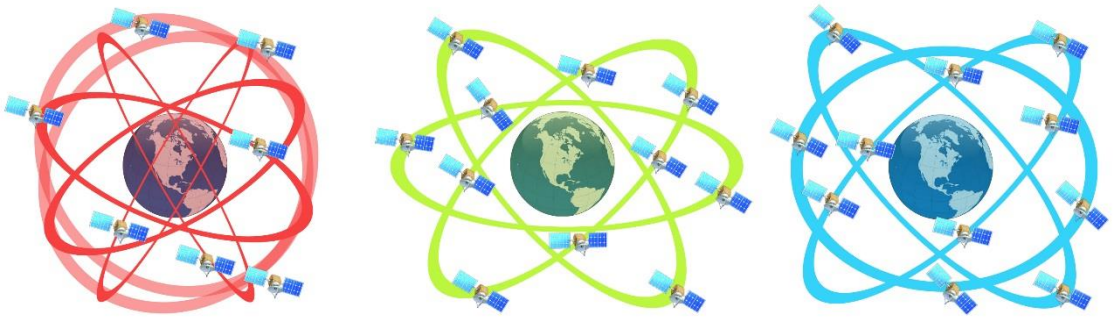
Sistemin ilk uydusu olan Giove uydusu 28 Aralık 2005 tarihinde Kazakistan uzay istasyonundan fırlatılmıştır. 2006–2007 yıllarında sistem uydularının tamamlanması, yörüngelerine oturtulması, çalışmaları tamamlanarak, 2008 yılında sistemin kullanıma açılması öngörülmüştür. Ancak sistemde meydana gelen aksaklıklar nedeniyle sistem 2016 yılında devreye girebilmiştir. Galileo Avrupa'nın en büyük uydu sistemi haline gelmiştir. İlk 7 uydu Soyuz roketi ile 2011 yılında faaliyete geçerken, Ariane 5 roketi ile 4 adet Galileo uydusu yörüngeye oturtulmuştur. Günümüzde sistemde 30 adet uydu bulunmakta olup, 22 tanesi yörüngededir.

GPS ve Galileo her ne kadar farklı sistemler olsa da kullanıcı alıcılarının en iyi ölçme performansını elde etmeleri için birlikte çalışması zorunlu hale gelmiştir (Mekik, 2010; Blewitt, 2015).

- GPS L5 ve L1 sinyalleri Galileo E5 ve E2-L1-E1 sinyalleri ile kısmi olarak örtüşmektedir.
- Galileo'nun diğer uydu sistemlerinden farkı, global anlamda Arama ve Kurtarma (SAR) fonksiyonuna sahip olmasıdır. Söz konusu fonksiyon faal durumdaki CORPAS-SARSAT sistemine dayanmakta olup, her uydusunda acil durum sinyallerini Arama ve Kurtarma Koordinasyon Merkezine ileten aktarıcı bulunmaktadır. Mevcut sistemlerle karşılaştırıldığında Galileo'nun bu özelliği üstünlük olarak sayılmaktadır.

[4] Başlangıçta aynı frekans tayfında bulunan birden çok kaynaktan her biri, farklı bir frekans bandına dönüştürülür ve aynı anda tek bir iletim ortamına iletilir.

GPS, Galileo ve GLONASS sistemleri arasındaki farklılıklar Van Sickle (2015) tarafından incelenmiş ve Şekil 2.1'te özetlenmiştir.



GPS	Galileo	GLONASS
- 6 Yörünge Düzlemi	- 3 Yörünge Düzlemi	- 3 Yörünge Düzlemi
- 24 Uydu + Yedekler	- 27 Uydu + 3 Yedek	- 21 Uydu + 3 Yedek
- 55^0 Eğim Açısı	- 56^0 Eğim Açısı	- 64.8^0 Eğim Açısı
- Rakım 20.200 km	- Rakım 23.616 km	- Rakım 19.100 km

Şekil 2.1: GPS, GALILEO ve GLONASS Sistemleri Arasındaki Farklar. Van Sickle (2015)'dan Uyarlanmıştır.

2.1.4 COMPASS / BEIDOU

Deniz araçlarının navigasyonunun sağlanabilmesi maksadıyla 1983 yılında Çin Halk Cumhuriyeti, bağımsız uydu sisteminin kurulumuna başlamıştır. BeiDou uydu konum belirleme sisteminin temelleri 1994 yılında atılmış ve sistemin ilk uydusu 2000 yılının Ekim ayında fırlatılmıştır. Mevcut Beidou-1 sistemi (dört uydudan oluşmaktadır) deneysel olup kısıtlı kapsama ve uygulama alanına sahiptir. Ancak, COMPASS sistemiyle Çin Halk Cumhuriyeti 35 uydudan oluşan gerçek bir global uydu navigasyon sistemi geliştirmeyi planlamaktadır.

Yeni sistemde global kapsama sağlayacak olan 5 adet yer sabit yörünge (GEO) uydusu ve 30 adet orta yer yörüngesi (MEO) uydusu bulunmaktadır. COMPASS, beşi sivil kullanıma açık, geri kalanı kısıtlı yetkili servislere açık olmak üzere 10 servis sunacaktır. Bu servislerin sekiz farklı taşıyıcı frekansla verilmesi öngörülmektedir. 2013 itibariyle, BeiDou uydu konum belirleme sistemi 22 adet operasyonel uyduya sahip olup, global takımı 2020 yılında tamamlamayı planlamaktadır (Mekik, 2010; Blewitt, 2015).

2.1.5 Diğer gelişmeler

Japonya Quasi-Zenith Uydu Sistemi (*Quasi-Zenith Satellite System*, QZSS) eğik jeosenkronize yörüngesinde bölgedeki GPS'i geliştirmek amacıyla üç adet uydu barındırması planlanmıştır. Kasım 2018'den bu yana dört uydudan oluşan bir sistem işletilmektedir.

Benzer şekilde, Hindistan Bölgesel Navigasyon Sistemi (*The Indian Regional Navigation Satellite System*, IRNSS) 1 Temmuz 2013 yılında hayata geçirilmiş, 31 Ağustos 2017 yılında 7 uydusunu (3'ü yer merkezli yörüngede 4'ü eğik jeosenkronize yörüngede) devreye sokmuştur (Mekik, 2010; Blewitt, 2015). Global konum belirleme sistemleri ve özellikleri Çizelge 2.2'de özetlenmiştir.

Tüm bu uydu sistemleri ve diğer gelişimlerin temel amacı GNSS sinyallerine erişimin sağlanabilmesi amacıyla GPS'e alternatif sistemler geliştirilmesidir. Global konum belirleme sistemlerinin tek bir hakimiyet altında olmaması fikri, diğer alternatif sistemlerin ortaya çıkmasındaki temel nedendir. Diğer bir neden ise, ulusal acil durumlarda (savaş, doğal felaket vb.) yeterli sayıda GNSS sinyaline duyulan ihtiyaçtır. Bu nedenlerden dolayı, GNSS'e duyulan ihtiyaç insan olduğu sürece baki kalacaktır. Mekansal referanslama, internet, navigasyon uygulamalarının bireysel kullanımlara sunulması GNSS'in etki ettiği alanı maksimum sınırlara ulaştırmıştır.

Gelecekteki GNSS sistemlerinin tasarımlarında yüksek duyarlılıklı uygulamalar göz önünde bulundurulacağı tahmin edilmektedir. Bu yüzden jeofiziksel uygulamalara bugünkü GPS'ten daha fazla uyum sağlayabileceği düşünülmektedir.

Çizelge 2.2: Global Konumlama Sistemleri ve Özellikleri Özet Çizelgesi.

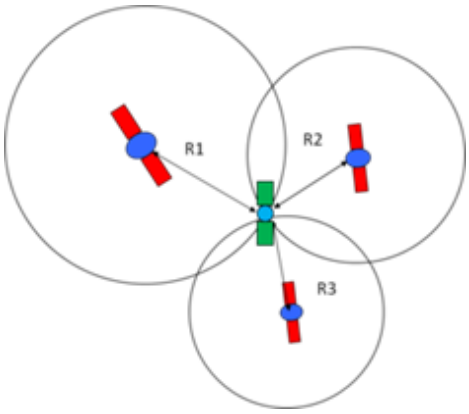
Sistem	**BeiDou**	**Galileo**	**GLONASS**	**GPS**	**QZSS**
Sahibi	Çin	AB	Rusya	ABD	Japonya
Kapsama	Bölgesel (2020'de Global)	Global	Global	Global	Bölgesel
Kodlama	CDMA	CDMA	FDMA	CDMA	CDMA
Yörünge Rakımı	21,150 km (13,140 mi)	23,222 km (14,429 mi)	19,130 km (11,890 mi)	20,180 km (12,540 mi)	32,000 km (20,000 mi)
Periyot	12.63 sa (12 sa 38 dk)	14.08 sa (14 sa 5 dk)	11.26 sa (11 sa 16 dk)	11.97 sa (11 h 58 dk)	
Taraf başına devir sayısı gerçek gün	17/9	17/10	17/8	2	
Uydu Sayısı	5 yer sabit yörünge (GEO) uydular, 30 orta yer seviyeli (MEO) uydular	24 14 operasyonel, 4 devreye girecek, Bütçeli 30 operasyonel uydu	28 24 operasyonel 2 uydu ana yüklenicsi tarafından kontrol altında 2 uçuş testleri aşamasında	31	2011 yılında Japonya Hükümeti, 2010 yılının sonlarına doğru 4 uydulu bir takımyıldıza ulaşmak için QZSS dağıtımını hızlandırmaya karar verirken, gelecekte 7 uydudan oluşan bir takımyıldızı hedefliyor.
Frekans	1.561098 GHz (B1) 1.589742 GHz (B1-2) 1.20714 GHz (B2) 1.26852 GHz (B3)	1.164–1.215 GHz (E5a ve E5b) 1.260–1.300 GHz (E6) 1.559–1.592 GHz (E2-L1-E11)	~1.602 GHz (SP) ~1.246 GHz (SP)	1.57542 GHz (L1 sinyal) 1.2276 GHz (L2 sinyal)	
Durum	22 uydu operasyonel , 40 ek uydu 2016-2020	18 uydu operasyonel 12 ek uydu 2017-2020	Operasyonel	Operasyonel	
Hassaslık	10m (Sivil) 0.1m (Şifreli)	1m (Sivil) 0.01m (Şifreli)	4.5m – 7.4m	15m (DGPS veya WAAS olmadan)	1m (Sivil) 0.1m (Şifreli)

2.2 GPS ve Özellikleri

2.2.1 GPS'in çalışma prensibi

GPS Uzay, Kontrol ve Kullanıcı olarak adlandırılan 3 farklı segmente sahiptir. Uzay segmenti 31 adet GPS uydusundan oluşur ve kullanıcıya sinyal ileten; görünen her uydunun, alıcıya anlık uydu pozisyonu, anlık uydu saat hatasını ve alıcının pozisyonunun tahmin edilmesi amacıyla gerekli bilgileri gönderen bir yapıdır. Kontrol segmenti (US Savunma Departmanı – *US Department of Defense*) uzay segmentinin izlenmesinden ve işletilmesinden sorumludur. Aynı zamanda uzay bölümünün alıcıya iletilen, GPS uydu yörüngelerinin ve saat hatalarının yakın gelecekte tahmin edilebilen bilgilerin yüklenmesini sağlar. Kullanıcı segmenti ise GPS donanımı (alıcılar, antenler) ölçme, navigasyon ve zamanlama uygulamaları gibi çeşitli aplikasyonlar için GPS veri değerlendirme yazılımını içerir.

GPS'in çalışma prensibi, alıcının konumunu elde etmek için konumu bilinen uydu ile alıcısı arasındaki mesafeyi kullanmaktır. *Trilateration* olarak adlandırılan bu yöntem bilinen en az üç noktaya olan uzaklık ölçümü ile yapılmakta olup, bu noktalar görünen uyduların konumlarıdır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: GPS Radyo Sinyalleri, NASA (2012)'den Uyarlanmıştır.

Yaşadığımız uzay üç boyutlu olduğundan dolayı alıcının spesifik konumu, üç uydunun alıcıya olan mesafesi yarıçap kabul edilerek çizilen küre kesişimiyle belirlenir. Uyduların atomik saati ve yeryüzündeki saat arasında zaman farkı bulunmaktadır. Bu durum 3 bilinmeyenli denkleme 4. bilinmeyeni eklemekte olup, 4. bilinmeyenin çözülmesi için 4. uyduya olan ihtiyaç ortaya çıkmaktadır.

Uyduların atomik saati ve yeryüzündeki GPS alıcıları doğrudan uzunlukları ölçememektedir. Onun yerine alıcı yerel saati ile uydudaki atomik saatin arasındaki zaman farkını hesaplayan '*pseudorange*' denklemi kullanılmaktadır. Bu denklemde uydu ve alıcı kodları arasındaki zaman kayması ışık hızıyla çarpılarak alıcının uyduya olan uzaklığı ölçülür (Denklem 2.1).

$$Pseudorange = [Alıcı\ Zamanı - Uydu\ Saati] x\ Işık\ Hızı \qquad (2.1)$$

Bu ölçüm uydu ve alıcı arasındaki değişik yayınım gecikmelerini içerdiğinden gerçek geometrik uzaklığı vermez. Bu nedenle sahte mesafe (*pseudorange*) olarak adlandırılır. Alıcı, kullanıcının üç boyutlu konumunu belirlemek için elde edilen uydu yörünge bilgisiyle sahte mesafe ölçümlerini işler.

Sahte mesafe (di), aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibi, gerçek mesafe (Di) ve alıcı saatinin uydudaki atomik saatler kadar hassas olmamasından ileri gelen yerel saat hataları (E_L)'nin ışık hızı (c) ile çarpımına bağlı bulunur (Şekil 2.3).

$$d_i = D_i + c.E_L \qquad (2.2)$$

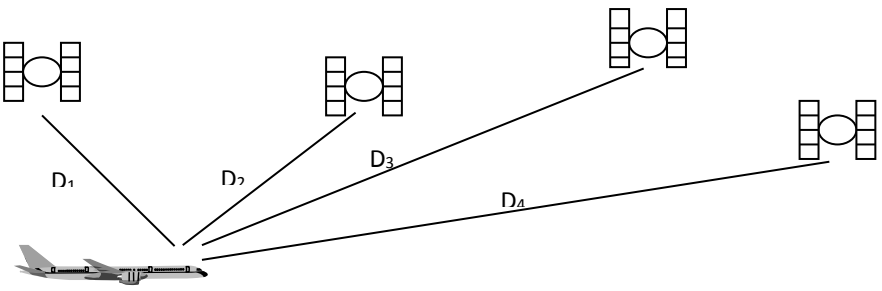
x,y,z : Hareketli cismin koordinatları.

Ölçümler: d_1, d_2, d_3, d_4

Uydu koordinatları : X_i, Y_i, Z_i.

$$(x - X_1)^2 + (y - Y_1)^2 + (z - Z_1)^2 = (d_1 - c \,.\, E_L)^2 = D_1^2$$
$$(x - X_2)^2 + (y - Y_2)^2 + (z - Z_2)^2 = (d_2 - c \,.\, E_L)^2 = D_2^2$$
$$(x - X_3)^2 + (y - Y_3)^2 + (z - Z_3)^2 = (d_3 - c \,.\, E_L)^2 = D_3^2$$
$$(x - X_4)^2 + (y - Y_4)^2 + (z - Z_4)^2 = (d_4 - c \,.\, E_L)^2 = D_4^2$$

Yukarıdaki dört bilinmeyenli denklemin çözülmesi ile x, y, z ve E_L bilinmeyenleri hesaplanır ve hareketlinin koordinatları belirlenir.



Şekil 2.3: Hareketli Cismin Uydulara Olan Uzaklığı.

Uydu, saat zamanını alıcıya şifreli mikrodalgalar ile iletir. Bu sinyal dizi +1, -1 kodları ile "sinusoidal taşıyıcı dalga"nın çarpılması ile elde edilir.[5] Alıcı aynı dalga kodunun kopyasını üretir ve çapraz korelasyonla gelen sinyal ile kodları aynı hizaya getirmek için gerekli süreyi hesaplar. Verilen herhangi bir zamanda gözlenen tüm uydular için bu sapma aynı olduğundan dolayı konum belirleme çözümlerinde bir ekstra parametre olarak tahmin edilebilmektedir. Uyduların atomik saatlerinde daha küçük hatalar vardır. Fakat bu hatalar, GPS uydusundan yayımlanarak alıcıya saat hatasını ileten başka bir kod üretilerek çözülür.[6]

Tüm bunlar bir araya getirildiğinde, GPS ile nokta konumu belirleme ve uydu konum belirlemede saat bilgilerinin GPS sinyalinin bir parçası olarak sağlandığı en az dört uydudan *pseudorange* ölçüsünün yapılmasının gerekmekte olduğu ortaya çıkmaktadır. Alıcı pozisyonunun üç koordinatı alıcı saat sapmasıyla eş zamanlı olarak tahmin edilebilir. Bu yöntemle, GPS ile konum belirlenmesi birkaç metre doğrulukla ticari GPS alıcılarıyla bile mümkün olabilmektedir.

GPS uyduları tarafından yayınlanan zaman sinyalleri, GPS master kontrol istasyonundaki atomik saatler ile eşzamanlı hale getirilir. Bu saatler de periyodik olarak Eşgüdümlü Evrensel Zaman (*Coordinated Universal Time*, UTC) ile uyumlu hale getirilir. GPS zamanı başlangıcı olan 6 Ocak 1980 tarihi itibariyle, GPS zamanı (sürekli zaman ölçeği) ve UTC arasında artık saniyeler birikmiştir (Temmuz 2012 itibarıyla 16 dakika).

Unutulmaması gereken bir şey var ki o da GPS'in bir zamanlama sistemi olduğudur. GPS uydularından iletilen radyo dalgalarındaki hassas zamanlama bilgisinin kullanımı ile alıcılar görünen her uyduya olan uzaklığı ölçebilmekte ve konumunu hesaplayabilmektedir. Ayrıca, her ölçü epoğunda[7] pozisyon hesabı yapılabilmektedir. Hız ve ivme gibi kinematik parametreler, pozisyonları ölçülen zaman serilerinden hesaplanmaktadır (Kaplan ve Hegarty 2005; Hegarty ve diğ, 2017; Blewitt, 2015).

GPS uydularının konumlarının belirlenmesi Kepler hareket kanunlarına göre yapılmaktadır. Kepler kanunları yörünge hareketine göre, her yörünge yaklaşık olarak elips şeklindedir. Dünyanın ağırlık merkezi ise yörünge elipsinin ortasındadır. GPS

[5] Sinyal (code ve taşıyıcı dalga) zamanı uydu saati tarafından kontrol edilmektedir.
[6] Rutin olarak US Savunma Departmanı tarafından güncellenir ve yönetilir.
[7] Özellikle araba navigasyonlarında saniyede bir kez olabilir (ilke olarak sık sık 50 Hz).

yörüngesi için, elipsin dış merkezliliği oldukça küçüktür. Elipsin üç boyutlu düzlemde x ekseninin yarıçapı 26.600 km dir. Bu uydular yerden yaklaşık 20.200 km uzaklıkta olup, ekvatorla 55^0 lik açı yapan 6 ayrı yörünge düzlemine yerleştirilmiş ve yaklaşık 12 saatlik periyotlara sahiptirler (Karaali ve Yıldırım, 1996; Blewitt, 2015).

Yörünge düzleminde yer alan dört uydunun elips etrafındaki aralıkları eşit değildir. Gerçek anomali dünyaya en yakın noktadan (*perigee*) ölçülür. Her ilgili zamanda uydunun anomalisini tanımlamak yerine uydunun perigee'den geçiş zamanını tanımlamak ve sonrasında uydunun elips etrafında bilinen hareket yasalarına dayanarak gelecekteki pozisyonunu hesaplamak daha uygundur. Sonuç olarak, perigee argümanı ekvator ve perigee arasındaki açıyı tanımlamaktadır. Birlikte alınırsa; dış merkezlilik, X ekseni, eğim açısı, rektasansiyon, perigeden geçiş zamanı, perigee argümanı Kepler modeline göre uydu yörüngesini tanımlar. Bu parametreler Kepler parametreleri olarak bilinir. Günümüzde Kepler elemanları verilen uydunun koordinatlarını hesaplamak mümkündür.

GPS uyduları kusursuz bir elips üzerinde hareket etmediklerinden dolayı ek parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bununla birlikte, GPS Kepler Kanunlarını kendi lehine kullanır. Uydu yörüngeleri Kepler elamanları ile "*broadcast ephemeris*"te tanımlanmaktadır. Ekstra parametreler, Kepler kanununa uyulması amacıyla eklenmek zorundadır. Bu parametreler kontrol bölümü tarafından her saatte validasyonunun başarıyla korunması için güncellenmektedir (Van Diggelen, 2009; Hegarty ve diğ, 2017).

Bahsi geçen yörüngesel parametreler ve Kepler hareket kanunundan yörünge tasarımının birçok sonucu ortaya çıkarılabilir. İlk olarak, uydu hızı dünya merkezine göre yaklaşık 4 km/s'dir ve bütün GPS uydularının yörüngeleri "*prograde*"dir. Başka bir deyişle dünya ekseninin dönme yönü ile uydunun dönme yönü aynıdır. Bu yüzden uydu ve yeryüzündeki kullanıcı arasındaki rölatif hareket 4 km/s'den daha az olmalıdır.

İkinci sonuç ise tekrarlı zemin izlemeleridir. Yörüngesel devir yaklaşık olarak 11 saat 58 dakikadır dolayısıyla GPS uydusu, yörüngesini 2 devir sonunda 23 saat 56 dakikada tamamlar. Dünya bir yıldız gününde[8] 360 derece dönüşünü tamamlamış olmaktadır.

[8] Dünyanın kendi ekseni etrafında uzak yıldızlara göre tam bir dönüş yaptığı süreye yıldız günü denir.

Uydu dünya yüzeyine göre her gün aynı coğrafi lokasyonda bulunmaktadır. Sonuç olarak, kullanıcının bakış açısından aynı uydu, gökyüzünde her gün aynı noktada 4 dakika daha geç gözükür.

Dolayısıyla kullanıcının bakış açısından, bütün uydu geometrisi kendini her yıldız günü tekrar eder. Sonuç olarak uydu geometrisiyle alakalı her hata kendini tekrar edecektir. Uydu geometrisine bağlı, uydudan yayınlanan sinyalin yakın objeler tarafından yansıması ve kırılmasına bağlı hata olarak sinyal yansıması (*multipath*) gösterilebilir. Her yıldız günü için modellenebilen gözlem artıkları, koordinatların tahmin edilebilirliğini önemli ölçüde etkilemez. Fakat doğruluk, görünen hassasiyetten daha kötü etkilenir.

Bunun diğer bir sonucu ise; her gün aynı coğrafi lokasyona sabitlenen 24 uydunun alt grubu olan uydular gözlemlenecektir. Genellikle gözlenen 24 uydunun hepsi sabitlenen konumda gözükmez. Bu da alıcıların neden global olarak dağıtılması gerektiğini ve her uydunun izinin iyi sürülmesinin gerekli olduğunu açıklar (Blewitt, 2015) .

Aynı zamanda 55 derecelik yörünge açısının kullanıcı açısından bazı sonuçları vardır. Mesela, sadece 90 derecelik yörünge açısı doğrudan kutuplar üzerinden geçebilirken, geri kalan durumlarda bu beklenmemektedir. Kullanıcı bakış açısı tarafından uydunun göksel izi, gökyüzünde göksel kutbun üzerinden geçemez. Aslında gökyüzünde uydunun asla geçmediği bir boşluk bulunmaktadır.

55 derecelik yörünge düzleminin dairesel hareketi sonucunda uydunun kutup noktalarından 35 derecelik mesafede hiç geçmediği bir dairesel alan bulunmaktadır. Başka bir deyişle, uydu ekvatordan 55 derece yukarı veya aşağı paralellere ulaşabilirken kutuplara kadar kalan bölgeye hiçbir zaman uğrayamamaktadır. Bu sebeple, kutuplarda uydu izi geçmediğinden ve uydular ufka yakın gezindiğinden dolayı düşey konum belirleme doğruluğu diğer bölgelere göre daha düşük olur.

Gözlemcinin konumu uydunun konumunun belirlenmesinde etkin rol almaktadır. Mesela, ekvatordaki gözlemci uyduları doğrudan görmesine rağmen ufuktaki uydu konumlarını kuzey ve güney yönünde kısmi hatalı görmektedir.

Yeryüzünün dönüş rotasyonundan dolayı GPS uyduları yeryüzü rotasyonundan daha hızlı hareket eder. Diğer bir örnekte ise uydular ekvatorda kuzey-güney veya güney-kuzey doğrultusunda ve biraz da doğu-batı yönünde hareket ederken gözlemlenirler.

Bu yüzden ekvatora yakın olan gözlemciler, konumun kuzey bileşenini doğu bileşenine nazaran daha iyi belirler. Kuzey yarım kürede orta enlemde yer alan gözlemci ise, gökyüzünün herhangi bir yerindeki uyduyu güneyde görür. Özetle, gözlemcinin konumunun uydu gözlemi ihtiyacına göre belirlenmesi iyi bir izleme için önem arz etmektedir.

2.2.2 GPS'in sinyalleri ve özellikleri

Kod Bölmeli Çoklu Erişim (*Code Division Multiple Access*, CDMA), uydular tarafından kullanılan dağınık spektrum formudur. Aynı frekansta olsalar bile GPS uydu sinyalleri sözde rastlantısal dijital diziler ya da kodlar tarafından değiştirilirler. Her uydunun kullandığı farklı bir sözde rastlantısal kod vardır. Sadece rastgele yayımlanan sözde rastlantısal sinyal ile belli bir zaman sonrasında tekrarlanmaktadır. Alıcılar her uyduya özel sözde rastlantısal kodu bildiklerinden dolayı her uyduya özel CDMA sinyali ile bağlantı kurabilirler.

Uyduların oryantasyonu güneşin ve dünyanın konumuna göre sürekli değişmektedir. Güneş panelleri sürekli yüzünü güneşe doğru dönerken, antenler yüzünü yeryüzünün merkezine doğru döner. Sinyaller uydu tarafından mikrodalga kullanılarak yayınlanır ve iletilirler. GPS'in kullanıcı segmentine L1=1575.42 MHz (C/A ve P/Y kodu, L1C) ve L2=1227.60 MHz (L2C ve P/Y kodu) frekanslarında yeryüzü yönünde yayımlanmaktadır. GNSS siteminde çift frekans kullanılmasının temel sebebi yedek sinyal ve iyonosferik etkilerin en doğru şekilde kestirilmesidir. L1 ve L2 taşıyıcı frekansları uydu saati düzeltmeleri, yörünge parametreleri gibi bilgileri yeryüzündeki alıcıya ulaştırırlar. Her bir uydu kendi PRN (*Pseudo Random Noise*) numarasıyla yayın yaptığından bu veriler karışmamaktadır. Yeni nesil uydularda L5 sinyali de bulunmakta olup 1176.45 MHz'dir. Bu sinyal diğer iki sinyale göre 4 kat daha güçlüdür. L5 sinyali, hava araçlarının güvenli yönlenmesi maksadıyla kullanılmaktadır. L-Bant tercihinin temel sebebi bu bandın iyonosferden daha az etkilenmesidir.

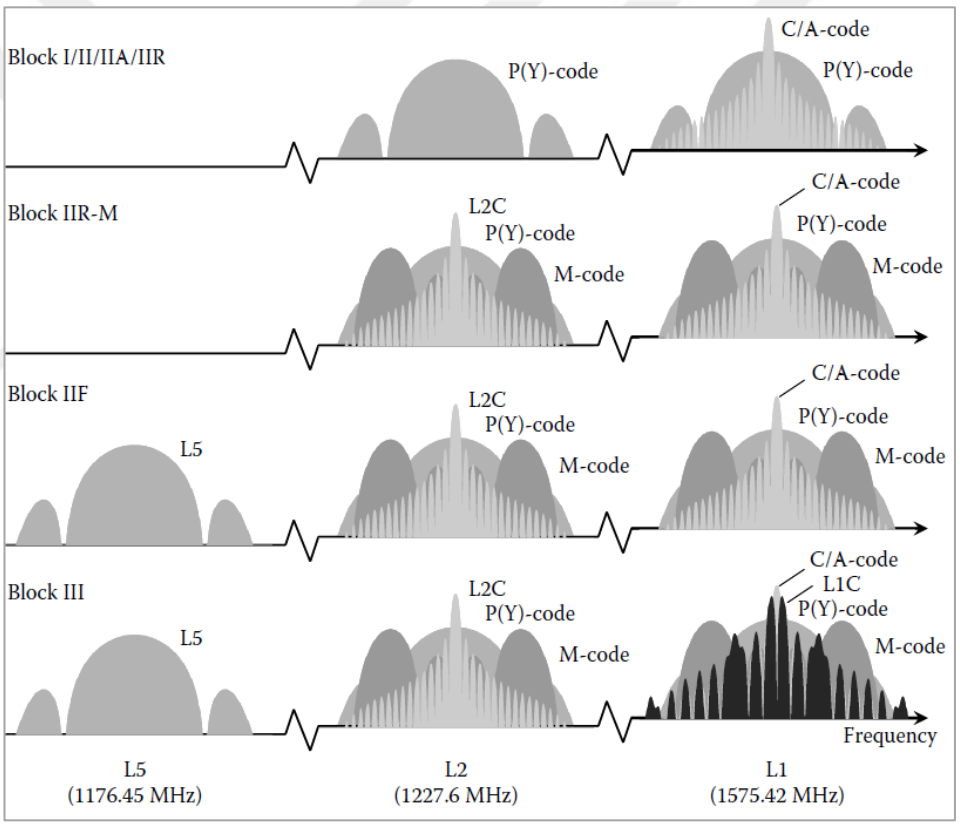
L1 taşıyıcı frekansı üzerine sivil kullanıcılara açık olan C/A (*Clear Access*), askeri P (*Precise*) kodlar ve uydu navigasyon verileri modüle edilmiştir. L2 üzerine ise sadece P kod ve navigasyon verileri modüle edilmiştir.

C/A kod periyodu 1 milisaniye olup, alıcının uydulara çok hızlı kilitlenmesini sağlamaktadır. Genel olarak sivil standart konum belirleme amacıyla kullanılır.

C/A'nın dalga boyu 293 m'dir. Günümüzde sinyal işleme tekniklerinde hassasiyet yüzde 1'lik dalga boyunu tespit edecek seviyede olduğundan, sinyalin çözünürlüğü 2,9 m seviyelerindedir.

P-kod ise L1 ve L2 taşıyıcılarının her ikisine de modüle edilmiştir. P-kod dalga boyu 29,3 metre olup, çözünürlüğü 30 cm seviyelerindedir. P kodun herhangi bir elektronik karıştırmaya maruz kalmaması için AS (*Anti Spoofing*) ile kriptolanmıştır. P (Y) kodu ile ABD askeri birimlerinin ya da müttefik ülkelerin erişim hakkı olan kriptolu hassas konum bilgisi yayımlanır.

Bunlara ek olarak M kodunun (Military) ABD'nin askeri amaçları için kullanılması planlanmaktadır. GPS sinyallerinin yıllara göre evrimi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: GPS Sinyallerinin Evrimi. Hegarty ve diğ, (2017)'den Uyarlanmıştır.

Ayrıca bu sinyallere kullanıcı GPS alıcısı tarafından okunabilen "Navigasyon Mesajı" kodlanmıştır. Navigasyon mesajı, alıcının uydu koordinatlarını (X, Y, Z) hesaplayabildiği yörünge parametrelerini içermektedir. Söz konusu mesaj, jeosentrik sistemde WGS84 olarak bilinen, merkezi dünyanın ağırlık merkezi olan, Z ekseni kuzey kutbunu, X başlangıç meridyenini, Y sağ el ortogonal koordinat sistemini gösteren koordinatlarını içermektedir. "*Ephemeris Algoritm*" olarak tanımlanan

algoritma, yörünge parametrelerini herhangi bir zamanda WGS84 uydu koordinatlarına çevirir. Jeodezik amaçlar için hassas yörünge bilgisi IGS gibi organizasyonlar tarafından yayınlanmaktadır (Kaplan ve Hegarty, 2005; Hegarty ve diğ, 2017; Blewitt, 2015).

Bunlara ek olarak sinyallerde RINEX veri dosyası ve uydu almanak bilgileri de yer almaktadır. Almanak bilgisinin temel amacı, alıcının açıldığında süratli bir şekilde uydulara bağlanabilmesini sağlamaktır. Bunun için doğruluğu oldukça düşük, uydu yörünge parametrelerini bünyesinde bulundurur. Bu bilgiler GNSS kontrol bölümü tarafından 6 günde bir güncellenir.

2.2.3 GPS'i öne çıkaran özellikler

Alıcıdan uyduya *pseudorange* ölçümü ile gelişmiş hassas konum belirlemeyi gerçekleştiren GPS'in tasarımı Doppler sisteminin geliştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Taşıyıcı faz izleme teknolojisi" sinyal ölçümünü milimetre hassasiyetine taşımıştır.

Doppler'in keşfi ile başlayan bu süreç 1979'dan 1990'a kadar GPS'in omurgasını oluşturan buluşlarla güçlenmiştir. İlk olarak, Çok Uzun Bazlı Enterferometri (*Very Long Baseline Interferometry*, VLBI) teknolojisi, NASA nın prototip jeodezik GPS alıcılarına uyarlanmıştır. 1979 yılında JPL tarafından geliştirilen SERIES alıcısı belirli bir zamanda tek bir kaynağa yönelebilirken aynı yıl icat edilen MITES donanımı çok yönlü çalışabilmektedir. Bu sayede ikili farklar yöntemi ile zaman hataları elimine edilerek santimetre doğruluğu sağlanmış olup bu yöntem kullanılarak Apollo görevi tamamlanmıştır. 1980'lerde TI 4100'ün icat edilmesiyle levha tektoniği hareketleri ölçülmeye başlanmıştır. Uzun mesafelerde belirsizlik çözümü, hassas yörünge tespiti ve troposfer modellemesi; GPS'in erken çağları sayılacak bu yılların önemli gelişmeleri arasındadır.

1980'lerin sonlarında GPS'in gelişimi için yapılan donanım ve yazılım çalışmaları uzun mesafelerde santimetre altı konum belirleme doğruluğuna ulaşmayı hedeflemiştir. Bu süreçte *rouge* adı verilen sayısal alıcı prototipi icat edilmiştir. Bu alıcı yüksek hassasiyetli *pseudorange* verisi üretebilmektedir. Bu sayede belirsizlik çözümü gibi veri işleme algoritmaları geliştirilmiştir. 1994 yılında GPS'in 24 uydusuyla tamamen operasyonel olması global konum belirleme ile ilgili çalışmaları daha da hızlandırmıştır. Bu çalışmalara örnek olarak; yüksek dereceli iyonosferik

modeller, hızlı veri işleme algoritmaları, alıcı merkezi kalibrasyonu verilebilir. Son yıllarda uzun mesafelerde santimetre altında doğruluk güncel yazılım ve donanımlar sayesinde elde edilmektedir. Özellikle Bern Üniversitesi'nde geliştirilen Bernese, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü tarafından tasarlanan GAMIT-GLOBK ve JPL tarafından ortaya konan GIPSY-OASIS yazılımları yeni algoritmalar kullanarak belirsizlik çözümünde etkin olmuştur. 1979'dan bugüne yaşanan gelişmeler Çizelge 2.3'te özetlenmiştir (Blewit, 2015).

GPS teknolojisi özellikle sivil amaçlar için kullanıma açıldıktan sonra birçok çalışmaya konu olmuş, bu da GPS teknolojisinin daha da ileriye gitmesini sağlamıştır.

GPS, ITRF'te milimetre doğruluğunda belirleme yapabilen jeodezik alıcıları ile 31 adet aktif çalışan uyduya sahiptir. Bu sistemin aktif çalışabilmesi için; *multipath* etkisini ortadan kaldıran antenlerle birlikte, çift frekansla çalışan jeodezik alıcılar, çeşitli ulusal ve uluslararası üniversiteler ve devlet kurumları tarafından geliştirilen jeodezik araştırma yazılımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Söz konusu yazılımlar; yeryüzü, atmosfer ve uydu dinamiğine ait modeller ve sinyal işleme, stokastik parametre kestirimi gibi veri değerlendirme algoritmalarıdır.

Çizelge 2.3: GPS'e Uygulanan Modeller ve Teknolojide Yaşanan Gelişmeler. Blewit (2015)'tan Uyarlanmıştır.

GPS Gelişim Tablosu
- IGS tarafından global ağ oluşturuluşu - Global ölçekte belirsizlik çözümü - Troposferik modellerin geliştirilmesi, troposferik gecikme modellerinin dâhil edilmesi - JPL'da geliştirilen ve IGS standart tasarımı olarak kalan, GPS alıcılarında baseband-digital GPS alıcılarının, düşük multipath choke ring anteni adaptasyonu - GPS uydu konumuna göre geliştirilen yörünge modelleri, güneş radyasyon baskısı için geliştirilen modeller - Gelişen referans sistemleri - Yörünge ve istasyon pozisyonları referans olmadan global analiz için geliştirilen eş zamanlı çözümler - İstasyonlar ve GPS uyduları için anten faz merkezi değişimi modellemesi ve kalibrasyonu, ITRF istasyonlarının sıklaştırılması ve büyük bölgesel jeodezik GPS istasyonlarının kurulması - Daha hızlı veri değerlendirme algoritmaları ve ortak mod sinyal analizi ile geniş bölgesel ağların gelişmiş analizi - Tekrarlı multipath etkisini gidermek amacıyla sinyal analizleri algoritmasını içeren tsunami uyarı sistemleri, GPS sismolojisi gibi gerçek zamanlı jeodezik analizlere doğru hareket etme - Yörünge belirlemesi, troposfer modellemesi ve yüksek derece iyonosfer modellemesindeki gelişmeler - IGS'in 1994'teki çalışmaya başlamasıyla birlikte, modellemedeki önemli çalışmalar ile GPS global veri setleri veri değerlendirmesi - İstasyon koordinat zaman serileri, yörünge ve saat doğruluğu gibi yüksek kalite GPS veri ürünleri

GPS diğer sistemlere nazaran dünya çapında kabul görmüş olup, bu sayede gelişimini devam ettirmektedir. GPS'in jeodezik gelişimini sağlayan faktörler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Radyo tekniği olarak GPS–VLBI'nin, uydu dinamik teknikleri olarak GPS-SLR'nin benzerlikleri GPS jeodezisinin geliştirilmesine büyük oranda katkı sağlamıştır. ITRS sözleşmesi tarafından farklı uzay jeodezisi tekniklerine ait sonuçların doğruluğu ve uyumunun geliştirilmesini hedefleyen standartlarda modeller üretilmiştir.
- GPS, çok uzun bazlı enterferometrisi ve uydu lazer ölçmeleri ile benzer hassasiyette ve daha düşük maliyetlidir.
- GPS kamuya açık ve ücretsizdir. Bu durum üniversitedeki araştırmacıların GPS'e rahatlıkla ulaşabilmelerini ve gözlem modellerinin daha doğru bir şekilde üretilebilmesini sağlamıştır.
- GPS istasyonları yer değiştirebildiği ve yeryüzündeki deformasyon alanının örneklenmesinde pratik bir yol sağladığı için uzay jeodezisindeki birçok bilimsel soruya cevap verebilmektedir.
- GPS, ITRF'te tanımlandığı için araştırmacı tarafından özel bir koordinat sistemine ihtiyaç duyulmamaktadır.

Bununla birlikte, GPS hatasız çalışıyor demek doğru değildir. GPS'in hata oranını düşürmek için birçok yöntem denenmiştir. GPS doğruluğunu geliştirmeyi hedefleyen modeller, Uluslararası Jeodezi ve Jeofizik Birliği tarafından yapılan araştırmalar sonucunda geliştirilmiştir. Bugün otomatik veri değerlendiren internet servisleri kullanılarak, GPS konusunda uzman olmayan kişiler dahi GPS verisi toplayabilmekte ve santimetre doğruluğunda alıcı konumu elde edebilmektedir.

2.2.4 Yüksek hassasiyetli GPS

En az dört uydudan yapılan *pseudorange* ölçüsü ile GPS, kullanıcılarına metre ve 0.1 μs (10^{-6} saniye) doğruluğunda zamanlama bilgisi sağlamaktadır. Diğer yandan birkaç milimetre doğruluğunda GPS konum belirleme doğruluğu elde edilebilmesi için, uydu konum ve saat hata bilgisine ihtiyaç vardır. Standart GPS konum belirlemede '*efemeris*' bilgisi GPS uydularından navigasyon mesajı adı altında yayımlanmaktadır.

Fakat bu jeodezik uygulamalar için yeterli doğrulukta kabul edilmemektedir (Blewitt, 2015).

GPS'in uzay, kontrol ve kullanıcı bölümlerine ek olarak servis bölümü, konum belirleme doğruluğunun artırılabilmesi amacıyla sivil ağlardaki kullanıcıya veri sağlamaktadır. Bu veri kullanıcıya internet, cep telefonu ve sabit yörüngeli uydu tarafından gönderilir. Servis bölümüne, jeodezik konum belirleme ile ilgili kısmından uydu yörüngesi ve saatlerine ilişkin yüksek doğruluklu bilgi sağlayan IGS kuruluşu sorumludur. IGS aynı zamanda, dünya üzerindeki konumu bilinen yer kabuğu hareketleri ve deprem gibi jeofiziksel hareketler hakkında referans istasyonları aracılığıyla veri toplamaktadır. Bu yüzden, IGS kullanıcılara alıcılarını dünya üzerindeki herhangi bir yerde konumlandırmaları için yersel referans çerçevesi ile uyumlu olarak milimetre duyarlılığında veri sağlamaktadır.

Pratikte, troposferik yansımayı modellemek için ek parametrelere ihtiyaç vardır, bu sebeple yüksek hassasiyetli GPS jeodezisi en az 5 uydunun görünebilmesine bağlıdır. Mutlak minimumda, troposferik modellemeye dayalı olarak haritalama işlevi "*mapping function*" kullanılarak her yükseklik açısındaki gecikmeyi haritalayan; zenit gecikmesi tahmin edilir (Herring, 2010, Blewitt, 2015).

Jeodezik uygulamalarda sadece pseudorange gözlemi değil taşıyıcı faz gözlemi de yapabilen gelişmiş GPS alıcılarına ihtiyaç vardır. Taşıyıcı faz gözlemi (Denklem 2.1) gelen taşıyıcı faz dalgası ve alıcının içinde üretilen alıcı saatiyle senkronize sinyal fazı arasındaki farka (Denklem 2.3) dayanır. Bu farkın yaklaşık 20 cm'lik dalga boyu ile çarpılması uyduya olan yanlı mesafeyi vermektedir. Aslında bu tip pseudorange kodlanmış pseudorange dan 100 kat daha hassastır. Taşıyıcı faz gözleminin negatif yanı, alıcı saat hatasına ek olarak; bilinmeyen dalga boyu sayısıdır. "Belirsizlik Çözümü[9]" tekniğiyle bu durum çözülebilmektedir. Belirsizlik çözümü jeodezik uygulamalarda yüksek hassasiyetin elde edilmesinde büyük önem taşımaktadır. Gözlemlenen taşıyıcı faz;

$$Taşıyıcı\ Faz = (Referans\ Faz - Sinyal\ Faz + Sayı\ (Integer)) x\ Taşıyıcı\ Dalga\ Boyu \quad (2.3)$$

[9] GPS ile konum belirlemede kullanılan faz ölçüleri aslında, bir uydudan yayınlanan taşıyıcı sinyalin fazı ile belli bir anda alıcıda oluşturulan taşıyıcı sinyal fazı arasındaki fark.

olarak gösterilmektedir. Sinyal fazı uydu saati tarafından, referans fazı ise alıcı saati tarafından üretilmektedir. Denklem (2.3) pseudorange açısından, Denklem (2.1)'den daha hassas olmasını karşın tamsayı belirsizliği içermektedir. Denklemlerde alıcı saat okuması, uydu saati ve saat hataları da dâhil olmak üzere teorik farklılık olmasına rağmen her iki denklemde de gözlemlenen modeller benzerdir.

Modellerdeki bu benzerlik, otomatik sinyal işlem algoritmasının gelişmesine imkan sunmaktadır. Bu algoritma sayesinde yeryüzündeki alıcı ve uydu arasında geçici bir engel olduğunda ortaya faz kesiklikleri çıkması gibi durumlarda tespit yaparak veri bütünlüğünü sağlamaktadır. Aslında, Pseudorange verisi taşıyıcı faz verisi ile birlikte kullanılarak başlangıç ve sonraki tam sayı belirsizliğini[10] (*cycle slips*) düzeltebilmektedir.

Jeodezik amaçlı konum belirlemede, dünyanın iyonosfer tabakasında meydana gelen gecikmenin kalibrasyonunun yapılabilmesi için; pseudorange ve taşıyıcı faz çift frekansta ölçülür (L1= 19.0 cm; L2 = 24,4 cm dalgaboyu). Bu ölçümlerle yüksek hassasiyetli GPS'te, 2 adet *pseudorange* ve 2 adet taşıyıcı faz gözlemi olmak üzere toplam dört temel gözlem elde edilir. Ayrıca bu gözlemlerle veri bütünlüğü sağlanmakta ve iyonosfer izlemesi gerçekleştirilmektedir (Herring, 2010; Schubert, 2015).

Jeodezik konum belirlemesinde diğer önemli olan gereksinim, taşıyıcı dalga faz modellemesi ile stokastik çoklu parametre tahmin eden özel yazılımların kullanımıdır. Söz konusu yazılımlar, uydu-istasyon geometrisi, atmosfer, medcezir, yeryüzünün rotasyonu, anten etkileri, dairesel polarizasyon etkileri ve bağıl etkileri modellemektedir. Aynı zamanda yazılım, taşıyıcı dalga fazı gözlemlerinde yaşanan kesiklikleri bulup düzeltme, ilk faz ölçümlerini ve tam sayı belirsizliğini çözmede yetenekli olmalıdır (Herring, 2010; Schubert, 2015).

Özet olarak; yüksek hassasiyetli jeodezik GPS'in gereksinimleri:

- Dual-frekans taşıyıcı faz verisi toplayan GPS alıcıları,
- IGS tarafından elde edilen uydu yörüngesi ve saat bilgisi,

[10] konumlanması istenen nokta için uydu ile alıcı arasındaki tam dalga boylarının sayısının bilinmemesi.

- En az 5 uydudan anlık gözlem,
- Yüksek doğruluklu, taşıyıcı faz verisi değerlendirme algoritmaları, anlık parametre tahminini kapsayan gelişmiş yazılımlardır.

IGS yörünge ve saat verisinin kalitesi sinyalin gecikme süresine bağlıdır. Genellikle, gecikme süresi ve doğruluk arasında bir denge söz konusudur. Bugünlerde, ultra hızlı IGS ürünleriyle 3-9 saat önceden yörünge ve saat verisini tahmin edebilmektedir. GPS uydularında atomik saatler olmasına karşın, saati tahmin etmek, uydu yörüngesini tahmin etmekten çok daha güçtür. Yeterli doğrulukta saat verisi elde edilemediği takdirde, yer istasyonları arasında bağıl konum belirleme için jeodezik çözümleri üretmek her şeye rağmen mümkündür. Bu da iki yolla başarılmaktadır. Birinci yol; uydu saat hatalarını her epokta konum belirlemenin bir parçası olarak çözmek; ikincisi ise, saat hatalarına son vermek için yersel istasyonlar arasındaki verilerin farkını alarak çift farklar[11] metodu uygulamaktır (Springer ve diğ, 2001).

2.3 Uluslararası GNSS Servisi

1980'lerde araştırma gruplarınca geliştirilen prototip alıcıların yaygınlaşması ve ticaretinin yapılabilir hale gelmesi, GPS istasyonu kurma maliyetinde ciddi bir düşme yaşanmasına neden olmuş, bu da GPS sistemine kolay ulaşılmasına imkan vermiştir. GPS kullanımının 1980'lerden sonra yaygınlaşması, uygulamalarının çeşitliliği ve gelişmesi karşısında bilim adamları GPS verilerinin elde edilmesi ve analizi için uluslararası standartları geliştirmeye, kapsamlı global izleme sistemini belirli bir planla ortak olarak kullanmaya ve işletmeye odaklanmışlardır.

Uluslararası GPS Servisi (*International GPS Service for Geodynamics*, IGS) bahse konu gelişmelerin bir parçası olarak, 1993 yılında Uluslararası Jeodezi Birliği (*International Association of Geodesy*, IAG) tarafından kurulmuştur. 1 Ocak 1994'ten itibaren GPS yörüngeleri, izleme verileri ve diğer ürünleri sağlamak maksadıyla jeodezik ve jeofizik araştırmalara destek vermektedir.

Yaklaşık sayısı 100 adet olan uluslararası araştırma istasyonlarının tek bir şemsiye altında birleşmesiyle GPS ağı oluşmuştur. Günümüzde GLONASS, Galileo, BeiDou,

[11] Aynı anda ölçüm yapan iki alıcı ve iki uyduya ait ölçüleri kullanarak ikili farkların oluşturulması.

QZSS ve SBAS'ı takip eden 400'den fazla kalıcı, sürekli çalışan araştırma istasyonu vardır.[12] 1994'ten bu yana IGS, bilimsel çalışmalara hassas GPS yörünge ürünlerini gelişen bir hassasiyette ve zamanlamada sunmaktadır (Sanlioglu vde İnal, 2004).

IGS'in görevi, dünya bilim araştırmaları ve çok yönlü uygulamaları desteklemek için GNSS standardında yüksek kalitede veri ve ürün sağlamaktır. Gereksinim ve hedefleri karşılayan yeterli doğruluktaki GPS gözlemlerinden oluşan veri ve ürün grupları IGS tarafından toplanır, arşivlenir ve kullanıcılara internet aracılığıyla ulaşabileceği şekilde dağıtılır. Söz konusu veri ve ürün grupları; GPS ve GLONASS uydu efemerisleri, iyonosferik haritalar, baçucu doğrultusu gecikme tahmini, GPS uydu ve IGS izleme istasyonları saat bilgisi, IGS izleme istasyonu koordinatları ve hızları, Dünya dönme parametreleri'nden meydana gelmektedir. IGS ürünleri, iyonosfer izlemesi, Dünya'nın dönüşü, sıvı ve katı kısmındaki değişimlerin izlenmesi, Uluslararası Yersel Referans Çerçevesi'nin (*International Terrestial Reference Frame, ITRF*) geliştirilmesi ve yayılması, su buharı ölçmelerinde yeterli doğruluğu sağlamaktadır.

WEGENER ve UNAVCO gibi jeodezik araştırma yapan toplulukların başarıları IGS'e bağlıdır. Benzer şekilde IGS de, kullanıcıların gönüllü olarak çalışma gruplarına katkısına ihtiyaç duymaktadır (Sanlioglu ve İnal, 2004).

Uluslararası GNNS Servisi (IGS), eski adıyla Uluslararası GPS Servisi, 80 den fazla ülkenin ve 200'den fazla organizasyonun katılım sağladığı gönüllü işbirliği yapısıdır. Küresel izleme ağı ile uydu efemeris ve saat çözümleri gibi hassas ürünleri formüle eden IGS analiz merkezlerine zengin veri seti sağlanır. IGS, veri ve ürünleri araştırmacılarla bedelsiz olarak paylaşmaktadır (Kouba, 2009). RINEX (*Receiver Independent Exchange*- Alıcı Bağımsız Değiştirme) olarak bilinen standart GPS ölçüm formatı IGS üzerinden elde edilen verinin kullanımını kolaylaştırmıştır. Format belirli aralıklarla güncellenmektedir. RINEX'in altyapısı biraz karmaşık olsa da, jeodezik operasyonlar ile jeodinamik operasyonlar arasında etkili bir ayrım ile iş birliği yapılmasına elverişlidir. Çözümden Bağımsız Değişim (*Solution Independent Exchange,* SINEX) formatı, birleşik ağ ve yeryüzü kinematiklerinin entegre çözümünü

[12] Her yerde her zaman doğru ve güvenilir koordinat üretmek için geliştirilen uydu bazlı iyileştirme sistemleri (SBAS) koordinatları bilinen istasyonlardan gelen veriler yardımıyla her uyduya ait pseduorange düz. hesapları kullanıcıya gönderilir.

gerçekleştirir. Bu format diğer uzay jeodezik tekniklerinin kabul edilmesini sağlamıştır (Blewitt, 2015).

Birleşik çözüm avantajları;

- Diğer çözümleri gözden geçiren gruplar arasındaki işlem yükünün dağıtılması,
- Kalite kontrol prosedürleri ile gürültü ve hataların azaltılması,
- Kapsama ve yoğunluğun artması,
- Bölgesel jeodinamiklerin kendi içinde tutarlı bir şekilde global bağlamda yorumlanabilir hale gelmesidir.

Yüksek duyarlılıklı jeodezi için IGS ürünleri, ilk servis olarak zaman içinde devamlı geliştirilmektedir. IGS ürünleri için seçilen istasyonların örnekleme aralığı 1-10 saniye arasında olup doğruluk seviyeleri Çizelge 2.4'te gösterilmektedir (Blewitt,2015).

Günümüzde, 10 kadar IGS analiz merkezi günlük ultra hızlı, hızlı ve final GPS/GLONASS yörünge ve saat çözümleri ile IGS kombinasyonlarına katkı sağlamaktadır. Küresel hassas GPS/GLONASS yörüngelerinin ve saatlerinin IGS tarafından santimetre hassasiyetinde hazırlanan, güncel ITRF referans çerçevesine uygun olarak yapılan günlük hesaplamaları global entegrasyon için bir bağlantı oluşturur. 2000 yılından itibaren, ultra hızlı ürünler meteorolojik uygulamaları ve alçak yörünge görevlerini (*Low Earth Orbiter*, LEO) desteklemek amacıyla tasarlanmıştır. Pilot projenin faaliyetinden birkaç yıl sonra 1 Nisan 2013 tarihinde IGS gerçek zamanlı servisi hassas yörünge ve saat ürünlerinin sağlanması amacıyla resmen açılmıştır. Gerçek zamanlı ve gerçek zamana yakın ürünleri kullanıcıların hizmetine sunulmuştur (Kouba, 2009).

Çizelge 2.4: IGS Ürünlerinin Doğruluk Seviyeleri.

Veri tipi	Gecikme Süresi	Güncelleme	Örnekleme Aralığı
Yer Gözlemleri GPS ve GLONASS Verisi	1 günlük 1 saatlik 15 dakikalık	Günlük Saatlik 15 dakikalık	30 saniye 30 saniye 1 saniye
GPS Yayım Efemerisleri	1 günlük 1 saat 15 dakika	Günlük Saatlik 15 dakika	N/A
GLONASS Yayın Efemeresi	1 gün	Günlük Saatlik	N/A
Meteorolojik	1 günlük 1 saatlik	Günlük Saatlik	5 dakika 5 dakika
Alçak Yörünge Gözlemleri GPS	4 günlük	Günlük	10 saniye

Metre hassasiyetinde konum belirleme ve navigasyon bilgilerinden faydalanan GNSS kullanıcıları için, IGS hassas yörüngeleri ve saatleri (15 dakika aralıklarla verilen) kullanılabilir hale gelmiştir. 2 Mayıs 2000 tarihinde GPS *Selective Availability*[13] (SA) kapandığından beri bahse konu ürünler GPS kullanıcılarını metre hassasiyeti isteyen uygulamalarda memnun etmektedir. Hem statik hem kinematik modlar için yüksek veri hızında gözlem sağlamaktadır. IGS sp3 dosyalarında verilen 15 dakika "SA-free" uydu saatleri ile dm (desimetre) seviyesinde hassasiyet mümkündür. Aynı zamanda, 26 Aralık 1999'dan beri münferit ve tutarlı, 5 dakika örnekleme aralıklarında uydu/istasyon saat kombinasyonlarına ulaşılabilir. 5 Kasım 2000'de saat kombinasyonları IGS saat ürünleri olarak resmi hale gelmiştir. 5 dakika saat örneklemesi, desimetre seviyesinin altında "SA-free" uydu saatleri interpolasyonuna olanak tanımaktadır. Saat interpolasyon hatalarını santimetre seviyesinde korumak veya daha altında tutmak amacıyla GPS haftası 1410'dan (14 Ocak 2007) itibaren dosyaları 30 saniye aralıklı IGS sonuç saat dosyaları kullanılmaktadır. Jeodezik hassasiyeti sağlamak amacıyla GNSS kullanıcıları GIPSY, GAMIT ve Bernese gibi gelişmiş bilimsel yazılım paketleri kullanmaya ihtiyaç duymaktadırlar. Bununla birlikte IGS gözlemlerinin GNSS taşıyıcı faz verisiyle birleştirilmesi ile kullanıcılar, IGS hassas yörünge ürünleri ve güncel ITRF ile uyumlu hassas rölatif konumlandırmayı diğer yazılımlara göre daha kolay elde etmektedir. Örneğin, uluslararası kabuller ve standartlara uyum sağlayan istasyon ve yörünge ürün verileri kullanıldığı sürece alıcı, üreticileri tarafından sağlanan diferansiyel yazılım paketleri de kullanılabilir (Kouba, 2009).

Farkı alınmamış taşıyıcı faz gözlemlerine dayanan, Hassas Mutlak Konumlama (*Precise Point Positioning*, PPP) algoritmaları fark alınmamış gözlemleri kullanan GIPSY gibi yazılımlara eklenmiştir. Bernese gibi geleneksel çift farklar kullanan yazılımlar da son zamanlarda hassas konum belirlemeye olanak tanımaktadır. Kullanıcılar, IGS yörünge ürünleri tarafından temin edilen referans çerçevesinde, santimetre hassasiyetinde konum elde edebilmek için tek istasyondan veri değerlendirme seçeneğine sahiptirler. PPP yöntemi, referans istasyon veya istasyon ağlarından eş zamanlı veri izleme ihtiyacını ortadan kaldırır.

[13] Askeri kullanım için ayrılan en yüksek kalitede sinyalin, sivil kullanımda bilerek bozulması.

Alternatif yaklaşım olarak, PPP yazılım uygulamaları kişisel bilgisayarlarda kullanılabilir. Bahse konu yazılım, tutarlı konvansiyonel modellemenin ve yüksek doğrulukta global referans çerçevesi ile IGS yörünge/saat birleştirilmiş ürünlerine ulaşma imkânı sağlamaktadır.

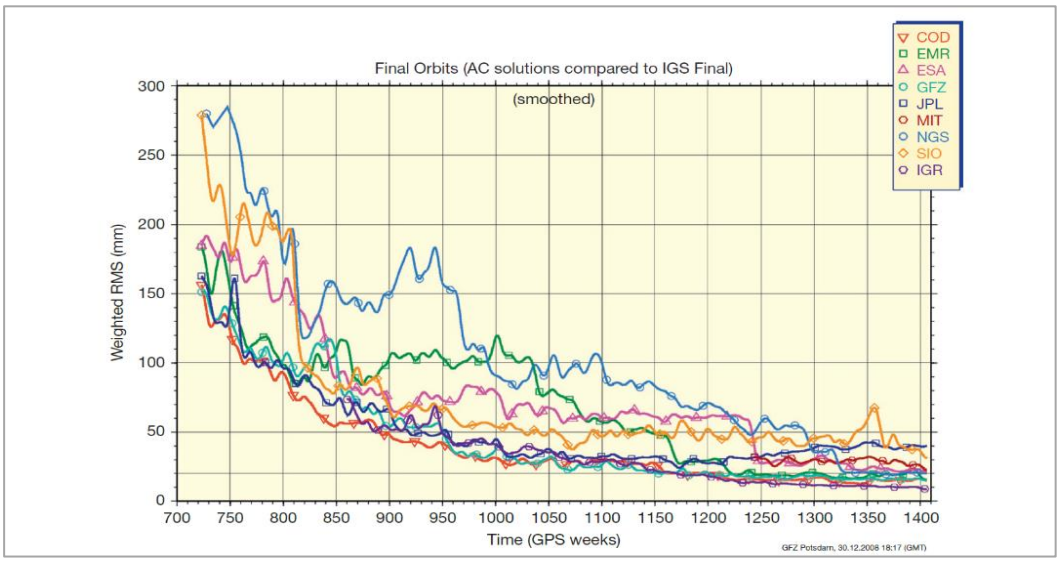
Kullanıcılar, IGS analiz merkezlerinin, güncel uluslararası kabuller ve standartları ile uyumlu, birleştirilmiş ve kalitesi kontrol edilmiş tüm IGS ürünlerinden tam olarak yararlanabilmektedir (Gezgin ve Acar, 2016).

2.3.1 IGS yörünge/saat birleştirilmiş ürünleri

Birleştirilmiş çözümlerin aynı gözlem veri setine dayanması, hatalı olsa bile, yeryuvarı dönme parametreleri ve istasyon koordinat çözüm tekliflerinin Uluslararası Yeryuvarı Rotasyon ve Referans Sistemi (IERS, *International Earth Rotation and Reference System Service*) tarafından yıllardır başarılı bir şekilde kullanılmasını sağlamaktadır. Böylece daha sağlıklı ve hassas çözümler elde edilebilmektedir. Bahse konu yaklaşım, IGS yörünge çözümlerinde de geçerli olup, belirli koşullarda, yörünge kombinasyonları hareket denklemlerini sağlayacak şekilde fiziksel olarak anlamlı yörüngeler göstermektedir. Ayrıca, analiz merkezleri yörünge kombinasyonlarından elde edilen ağırlıkları, ilgili Yeryuvarı Dönme Parametreleri (ERP, *Earth Rotation Parameters*) kombinasyonlarında kullanılır (27 Şubat 2000'den önce, IGS kombinasyonlarında yapıldığı gibi, hızlı ve ultra hızlı ürünlerde kullanılmaktadır). Ayrı olarak birleşmiş yörüngeler ve ERP çözümleri arasında önemli bir tutarlılık elde edilmektedir (Gezgin ve Acar, 2016; Kouba, 2009).

IGS birleşik yörünge/saat ürünleri, sonuç, hızlı, ultra hızlı, gerçek zamanlı servis ürünü (RTS, *Real Time Service*) olarak pek çok şekilde karşımıza çıkmaktadır. IGS ultra hızlı (IGU) ürünleri, 5 Kasım 2000'de (GPS haftası 1087, MJD 5183) eski IGS tahmin edilmiş yörünge ürünleri ile yer değiştirmiştir. Gerçek zamanlı servis birleşmiş ürünlerine 1 Nisan 2013'den (GPS haftası 1786/gün 2, MJD 56748) beri resmi olarak ulaşılabilmektedir. IGS birleştirilmiş yörünge/saat ürünleri bekleme süresi ve hesaplamalarda kullanılan izleme ağı büyüklüğüne göre değişiklik göstermektedir. IGS sonuç yörüngeleri, en fazla dokuz IGS analiz merkezi tarafından bağımsız 7 yazılım paketi kullanılarak birleştirilir. Bu yazılım paketleri: Bernese, GAMIT, GIPSY, NAPEOS, EPOS, PAGES, GINS/Dynamo'dir. IGS sonuç yörünge/saatlerine son gözlemden 13 gün sonra ulaşılabilmektedir. Hızlı yörünge/saat ürünleri ilgili

günün sonundan 17 saat sonra birleştirilir. Bekleme süresi; veri elde etme çeşitliliği, iletişim şemaları kullanan IGS global izleme ağı istasyonlarından elde edilen izleme verisi ve farklı kalite kontrol seviyelerinden kaynaklanmaktadır. Geçmişte IGS ürünleri sadece 24 saatlik periyotlarda izleme verisi içeren dosyalara dayanmaktaydı. 2000 yılında veri merkezlerinden ürün ulaşımını hızlandırmak için saatlik izleme verilerinin iletilmesi talep edilmiştir. Yeni öneri için özellikle meteorolojik topluluk ve alçak yörünge görevleri gibi gerçek zamanlı kullanıcıların taleplerini karşılayan sadece birkaç saat bekleme süreli (3 saat) ultra hızlı ürün gerekmiştir. IGS gerçek zamanlı pilot projenin tamamlanması gerçek zamanlı ürünlerin gelişimi ve çoğunlukla da uydu saat düzeltmeleriyle başarılmıştır (Kouba, 2009).



Şekil 2.5: IGS Hızlı (IGR) ürünlerinin ağırlıklandırılmış yörünge RMS leri ve IGS Sonuç Yörünge Ürünlerine Göre 1994-2015 yılları arasındaki Analiz Merkezleri Sonuç Ürünleri. Kouba (2009)' dan uyarlanmıştır.[14]

Geçmiş 15 yıl içerisinde, IGS sonuç birleşmiş yörüngelerindeki gelişmeler ile birlikte, analiz merkezlerinin sonuç ürünleri hassasiyeti 30 cm den 1-2 cm'ye kadar inmiştir (Şekil 2.5). IGS birleştirilmiş yörüngelerinin bugünkü hassasiyetine GPS haftası 1400'de (5 Kasım 2006) ITRF2005 ve IGS05'in tatbik edilmesi ile gerçekleştirilmiştir. IGS hızlı yörünge birleştirilmiş ürünlerin (IGR) hassasiyeti, daha az izleme istasyonu

[14] COD = Center for Orbit Determination in Europe, Switzerland; EMR = Natural Resources Canada; ESA= European Space Agency; GFZ= GeoForschungs Zentrum Postdam, Germany; GRG = Groupe de Recherche de Gèodèsie Spatiale (GRGS)/Centre National d'Etudes Spatialaes (CNES); JPL= Jet Propulsion Laboratory, U.S.A.; MIT = Massachusettes Institute of Technology, U.S.A.; NGS – National Geodetic Survey, NOAA, U.S.A.; SIO = Scripps Institude of Oceanography, U.S.A.

ve hızlı iletim zamanı ile analiz merkezi çözümlerinden daha yüksektir. Analiz merkezi/IGS Yeryuvarı dönme parametre *(Earth Rotation Parameters, ERP)* çözümleri 1994'ten bu yana benzer gelişmeler göstermektedir. IGS sonuç saat kombinasyonları incelendiğinde; küçük değerli hatalar çıkarılırsa farklı analiz merkezleri tarafından üretilen uydu saat tahminlerinin standart sapmasının 0,02-0,06 nanosaniye (ns) veya 1-2 cm olduğu görülür. Bu aynı zamanda yörünge hassasiyeti ile de tutarlıdır. IGS uydu saatlerindeki sapmalar kullanıcı tarafından tahmin edilmesi gerekli olan faz belirsizliği parametreleri içinde elimine edilecektir (Kouba, 2009).

2.3.2 IGS ürünleri

2.3.2.1 IGS sonuç ürünleri

IGS sonuç ürünleri (*IGS Final Products*), yüksek kaliteye sahip olup tüm IGS ürünlerinde sabit tutarlılığa sahiptir. Söz konusu ürünlere 13 -haftanın son günü için- ve 20 -haftanın ilk günü için- günlük gecikmelerle haftalık bazda ulaşılabilir. IGS sonuç ürünleri IGS referans çerçevesinin temelidir. Yüksek tutarlılık ve kalite talep eden uygulamalarda kullanılması amaçlanmaktadır (IGS, 2017).

2.3.2.2 IGS hızlı ürünler

IGS hızlı ürünleri (*IGR –IGS Rapid Products*), sonuç ürünleri ile neredeyse aynı kaliteye sahiptir. Bir önceki gözlem gününden yaklaşık 17 saat sonra günlük bazda ulaşılabilir (Alkan ve diğ, 2017).

2.3.2.3 IGS ultra hızlı ürünleri

IGS ultra hızlı ürünlerin (*IGU- IGS Ultra- Rapid Products*) üretimine resmi olarak Kasım 2000'de (1087 hafta) başlanmıştır. Eski IGS tahmin edilen ürünler gibi ultra hızı ürünler gerçek zaman ve gerçek zamana yakın kullanıcılar için uygundur. Ultra hızlı ürünler 03:00, 09:00, 15:00 ve 21:00 UTC olmak üzere günde dört defa yayınlanır (1267 haftaya kadar günde iki kere yayınlanır). Bu yolla ortalama tahmin süresi 6 saate düşer.[15] Düşük bekleme süresi, yörünge tahminlerinin önemli derecede gelişmesine yol açmakta ve kullanıcı uygulamalarında hataları azaltmaktadır. Bütün diğer IGS

[15] Eski IGS tahmin edilen ürünler 36 saatlik ve 9 saatlik günde 2 kez 9 saatlik ultra hızlı ürünlerle karşılaştırıldığında.

yörünge ürünlerinin aksine IGS ultra hızlı yörünge dosyaları 48 saatlik tablo halinde yörüngesel efemeris dosyaları içerir.

2.3.3 Çalışmada kullanılacak verinin elde edilmesi

Global Konumlandırma Sistemi, navigasyon ve hassas jeodezik konum ölçümleri için kullanılan uydulardan elde edilen veriler Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (*National Aeronautics and Space Administration,* NASA) tarafından kamunun kullanımına açılmıştır. 2000'den fazla alıcıdan gelen söz konusu veriler, Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü (*California Institute of Technology),* NASA ile sözleşme kapsamında JPL'de analiz edilmiştir. Bahse konu analiz aşamaları üç başlık altında toplanmıştır.

2.3.3.1 Yörüngelerin belirlenebilmesi aşaması

- Yaklaşık olarak 80 adet global GPS alıcısından günlük RINEX verileri toplanmaktadır. Uydu başlangıç koşulları, yerçekimsel olmayan uydu kuvvetleri, uydu saatleri, alıcı troposferik başucu gecikmesi ve gradyanları, alıcı konumları, alıcı saatleri, kutup hareketi, evrensel zaman oranı çözümlenmiş faz belirsizlikleri, serbest ağ GPS çerçevesinden ITRF2008/IGS08B'ye dönüşüm parametreleri ile uyumlu hale getirilirmektedir.
- Dünya, Güneş, Ay ve diğer gezegenlerden yerçekimi, DE421 gezegensel efemerisi, GSPM10 uydu güneş basıncı modeli, presesyon ve nutasyon için IAU06 modeli, IERS2010 gelgitleri, FES2004 okyanus yüklemesi, IGS uydu ve alıcı anten faz merkezi modelleri kullanılarak yörüngeler hesaplanmaktadır.

2.3.3.2 Nokta pozisyonlarını belirleme aşaması

- Binlerce GPS alıcısı için günlük RINEX dosyaları, uydu yörüngeleri, uydu saatleri, çözümlenmiş faz belirsizlikleri, yörünge belirlemesinde kullanılan dönüşüm parametreleri kullanılmaktadır.
- Alıcı troposferik başucu gecikmesi ve gradyanları, alıcı konumları, alıcı saatleri, çözümlenmiş faz belirsizlikleri ile uyumlu hale getirilmektedir. Serbest ağ yörüngeleri ve saatler kullanılarak dönüşüm parametreleri uygulanarak ITRF2008/IGS08B'deki konum tahminleri elde edilmektedir.

2.3.3.3 Zaman serilerinin oluşturulması aşaması

- Günlük GPS konum tahminleri, alıcı konumu - alıcı hızı - alıcı saati –mevsimsel alıcılar ile uyumlu hale getirilmektedir. Veri boşlukları hesaplanmasında istatistiksel yöntemlerle CHI^2 veri boşluğu olsun veya olmasın hesaplanmakta ve F> 200 olanlar kabul edilmektedir. Hatası > 10 mm büyük noktalar tüm bileşenlerde ayıklanarak zaman serisi oluşturulmaktadır.
- Web sitesinde yayınlanan tablolar ve grafikler oluşturularak, JPL tarafından GIPSY yazılımı ile analize tabi tutularak ve JPL'in ürettiği zaman serilerinden türetilen Dosya Aktarım Protokolü (*File Transfer Protocol,* FTP) sitesinde düzenlenmiş zaman serileri ve düzeltmeler (*residuals*) yayımlanmaktadır.

Çizelge 2.5'te gösterildiği üzere bahse konu zaman serileri 17 parametreden oluşmaktadır. Birinci parametre ondalık derece formatında yıl; ikinci, üçüncü, dördüncü parametre metre uzunluğunda sırasıyla doğu, kuzey ve düşey bileşeni yer değiştirmeleri; beşinci, altıncı, yedinci parametre sırasıyla doğu, kuzey ve düşey bileşenlerin sigma hatalarını; sekizinci, dokuzuncu, onuncu parametre sırasıyla doğu, kuzey ve düşey bileşenlerin birbirleriyle olan korelasyon değerlerini, on birinci parametre J2000'e göre saniye ölçüsünde zaman; on ikinci, on üçüncü, on dördüncü, on beşinci, on altıncı, on yedinci parametrelerde ise sırasıyla yıl, ay, gün, saat, dakika ve saniye olarak zaman yer almaktadır (NASA, 2016).

Çizelge 2.5: NASA'dan Elde Edilem Zaman Serileri Formatı.

Ondalıklı Yıl	Doğu (m)	Kuzey (m)	Düşey (m)	Doğu_sig (m)	Kuzey_sig (m)	Düşey_sig (m)	Doğu_ Kuzey_cov	Doğu _Düşey_cov	Kuzey _Düşey_cov	Zaman saniye J2000	Yıl	MM	DD	HR	MN	SS
1998,163	-0,50282	0,370728	-0,03384	0,000914	0,000921	0,004033	-0,00778	0,258775	-0,15648	-5,8E+07	1998	3	1	12	0	0
1998,248	-0,50425	0,364735	-0,02942	0,000953	0,000955	0,004179	0,019594	-0,02996	-0,12537	-5,5E+07	1998	4	1	12	0	0
1998,33	-0,49615	0,361202	-0,04082	0,000901	0,000905	0,003919	-0,03073	0,111284	-0,12233	-5,3E+07	1998	5	1	12	0	0
1998,415	-0,4954	0,358667	-0,03708	0,000978	0,000973	0,004286	-0,03783	0,202321	-0,06883	-5E+07	1998	6	1	12	0	0
1998,582	-0,49002	0,357614	-0,04118	0,000954	0,00095	0,004103	-0,03016	0,256776	-0,08547	-4,5E+07	1998	8	1	12	0	0
1998,667	-0,48785	0,354723	-0,04855	0,000912	0,000958	0,0042	-0,04259	0,389076	-0,12131	-4,2E+07	1998	9	1	12	0	0
1998,749	-0,48552	0,352148	-0,03262	0,000949	0,000955	0,004098	-0,0805	0,3531	-0,06015	-3,9E+07	1998	10	1	12	0	0
1998,834	-0,48061	0,356701	-0,05249	0,000928	0,000917	0,00405	-0,05315	0,400888	-0,10942	-3,7E+07	1998	11	1	12	0	0
1998,916	-0,48156	0,357455	-0,03704	0,000954	0,000948	0,004051	-0,0558	0,376085	-0,10618	-3,4E+07	1998	12	1	12	0	0
1999,001	-0,48028	0,35887	-0,03947	0,000971	0,000975	0,004266	-0,05029	0,308004	-0,11502	-3,2E+07	1999	1	1	12	0	0
1999,086	-0,47696	0,353437	-0,03505	0,000929	0,000922	0,004036	-0,02795	0,413738	-0,12923	-2,9E+07	1999	2	1	12	0	0
1999,162	-0,47208	0,350179	-0,04155	0,000932	0,000923	0,004088	-0,07894	0,267173	-0,12726	-2,6E+07	1999	3	1	12	0	0
1999,247	-0,46666	0,346182	-0,03631	0,000922	0,000957	0,004104	-0,03598	0,218092	-0,06143	-2,4E+07	1999	4	1	12	0	0
1999,329	-0,46438	0,342017	-0,03225	0,000938	0,000938	0,004184	-0,0306	0,463202	-0,07963	-2,1E+07	1999	5	1	12	0	0
1999,414	-0,46356	0,342411	-0,02351	0,00092	0,000961	0,004106	-0,03888	0,486609	-0,08446	-1,8E+07	1999	6	1	12	0	0
1999,496	-0,45856	0,34004	-0,04505	0,000988	0,001049	0,004674	0,014982	0,461056	-0,15729	-1,6E+07	1999	7	1	12	0	0
1999,581	-0,46232	0,337012	-0,03949	0,000921	0,000953	0,004206	-0,0338	0,436476	-0,0708	-1,3E+07	1999	8	1	12	0	0
1999,666	-0,45897	0,340438	-0,02295	0,000951	0,000965	0,00435	-0,04237	0,590296	-0,09925	-1,1E+07	1999	9	1	12	0	0
1999,833	-0,45857	0,335281	-0,04866	0,000913	0,000986	0,004191	-0,02101	0,116369	-0,04193	-5270400	1999	11	1	12	0	0
1999,915	-0,45211	0,336347	-0,03759	0,000895	0,000964	0,004249	-0,01303	0,105854	-0,08872	-2678400	1999	12	1	12	0	0
2000	-0,44866	0,341625	-0,03872	0,000903	0,000991	0,004179	-0,03692	0,114804	-0,12047	0	2000	1	1	12	0	0

2.3.4 RINEX in filozofisi

RINEX, Berne Üniversitesi tarafından, 4 farklı üreticiye ait 60'dan daha fazla GPS alıcısının dâhil olduğu büyük Avrupa GPS kampanyası EUREF 89 kapsamında toplanan GPS verisinin kolay değişiminin yapılabilmesi için geliştirilmiştir (NASA, 2015; IGS, 2016). RINEX formatı; gözlem veri dosyası, navigasyon mesaj dosyası, meteorolojik veri dosyası, glonass navigasyon mesaj dosyası olmak üzere dört adet ASCII dosyası içermektedir.

2.3.4.1 Gözlemlerin tanımı

GPS gözlemlerinde tanımlanan 3 temel büyüklük vardır: Zaman, faz, uzaklık.

Zaman: Ölçüm zamanı, alınan sinyallerinin alıcıya ulaşma zamanıdır.

Pseudorange: *Pseudorange*, alıcı antenin alıcı ve uydu saat kaymalarını içeren (atmosferik gecikmeler gibi diğer kayıklıklar) uydu antenine uzaklığıdır.

$$PR = Uzaklık + c.(\text{alıcı saat kayması} - \text{uydu saat kayması} + \text{diğer kaymalar (hata)}) \quad (2.4)$$

Dolayısıyla pseudorange alıcı ve saat hatalarının gerçek davranışını yansıtır. Metre olarak depolanır.

Faz: L1 ve L2 de bütün periyotlarda ölçülen taşıyıcı faz ölçümüdür. *Squaring type* alıcılar tarafından ölçülen yarım periyotlarda ölçüler tam periyoda dönüştürülmelidir.

Gözlemler, atmosferik yansımalar, uydu saat kaymaları ($dT(r)$) gibi dış etkiler için düzeltilmez. Alıcı veya dönüştürücü yazılımlar, gerçek zamanlı ölçümlerden türetilen alıcı saat kaymaları dengelerse; faz/pseudo-range/epok'ların tutarlılığının sağlanması gerekmektedir. Örneğin; alıcı saat düzeltmeleri bu üç gözleme uygulanmalıdır. Denklem (2.5), Denklem (2.6), Denklem(2.7)'te bu ilişki özetlenmiştir.

$$Zaman(corr) = Zaman(r) - dT(r) \quad (2.5)$$

$$PR(corr) = PR(r) - dT(r).c \quad (2.6)$$

$$Faz(corr) = faz(r) - dT(r).freg \quad (2.7)$$

2.3.4.2 RINEX dosyalarının değişimi

Veri merkezinden indirilen IGS verilerini kullanabilmek için, kullanılan işletim sistemine göre veri formatı yapısı bilinmelidir. Veri iletim zamanı veya depolama hacmi önemli olduğunda depolama veya iletimden önce dosyaların sıkılaştırılması için "sıkıştırma" ve "sıkıştırılmışı açma" UNIX programlarının kullanılması tavsiye edilir (IGS, 2016). Çizelge 2.6 'da bu yapıyı gösteren bir liste bulunmaktadır. Gözlem dosyaları, navigasyon ve meteorolojik dosyalar RINEX formatındadır. Gözlem dosyaları, fazla yer kaplamamaları için, Hatanaka formatında sıkıştırılmıştır. Hassas efemeris dosyaları SP3 formatındadır.

Çizelge 2.6: UNIX Sistemler için IGS Ürünlerine Ait Veri Formatı.[16]

Verinin İsmi	Formatı
RINEX Gözlem Dosyası	`ssssdddf.yyD.Z`
Navigasyon Mesaj Dosyası	`ssssdddf.yyN.Z`
Meteorolojik Dosya	`ssssdddf.yyM.Z`
Özet Dosya	`ssssdddf.yyS.Z`
Son Uydu ve Alıcı Saat Bilgileri Dosyası	`IGSwwwwd.CLK.Z`
Son Dünya Dönme Parametre Dosyası	`IGSwwwwd.ERP.Z`
Son Hassas Efemeris Dosyası	`IGSwwwwd.SP3.Z`
Haftalık Analiz Çözüm Özet Dosyası	`IGSyypww.SUM.Z`
Haftalık Analiz Çözüm Dosyası (Kovaryans Matrisi Dahil)	`IGSyypwwww.SNX.Z`
Haftalık Analiz Çözüm Dosyası (Kovaryans Matrisi Hariç)	`IGSyypwwww.SSC.Z`

Sıkıştırılan dosyalar için önerilen adlandırılma kuralları:

Sistem	Göz. Dos.	GPS Nav. Dos.	GLONASS Nav.	Dos. Met Dos.
UNIX	ssssdddf.yyO.Z	ssssdddf.yyN.Z	ssssdddf.yyG.Z	ssssdddf.yyM.Z
VMS	ssssdddf.yyO._Z	ssssdddf.yyN_Z	ssssdddf.yyG_Z	ssssdddf.yyM_Z
DOS	ssssdddf.yyY	ssssdddf.yyX	ssssdddf.yyV	ssssdddf.yyW

Sıkıştırılmış gözlem dosyaları için kullanılan Hatanaka dosya sıkıştırma şeması;

Sistem	Gözlem Dosyaları
UNIX	ssssdddf.yyD.Z
VMS	ssssdddf.yyD_Z
DOS	ssssdddf.yyE

[16] ssss:istasyon adını düzenleyici 4 karakter, ddd: ilk kayıtta yılın günü, f:gün içinde dosya sıra numarası, o: geçerli güne ait var olan bütün verileri içeren dosya, yy : yılın son iki basamağı, ww:yıl başından itibaren hafta sayısı, wwww:GPS haftası, t: dosya tipi, D: Gözlem Dosyası, N:Navigasyon Mesajı, M: Meteorolojik Veri Dosyası, G: GLONASS Navigasyon Dosyası

2.4 GNSS Gözlemi Modellemesi

GPS uydularındaki sinyaller 10.23 MHz frekansında atomik saatler ile hassas olarak yayımlanır. L1 kanalı için 154 (frekans=1575.42 MHz; dalga boyu = 19.0 cm), L2 kanalı için 120 (frekans= 1227.60 MHz; dalga boyu= 24.4 cm) ile çarpılmak suretiyle iki sinüzoidal taşıyıcı sinyali üretilir. Faz modülasyonu olarak bilinen işlem ile taşıyıcı sinyallerinin üstüne bilgiler kodlanır. İkili sayılar (*binary digits*), sinyalleri +1 veya –1 ile çarpılarak 0 ve 1 ile gösterilir.

Gözlem modellemelerinin gerçekleştirilebilmesi amacıyla; gözlemler L1 ve L2 olarak iki taşıyıcı faz, P1 ve P2 olarak iki *pseudorange* olarak adlandırılır. Sinyalleri ilişkilendiren pek çok sayıda farklı metot vardır. Buna rağmen, temel gözlem eşitlikleri aynı yol ile yazılabilir. Taşıyıcı faz durumunda genellikle her gözlem türünde, dalga boyu tam sayı hatasını içeren bir hata vardır. Karşılıklı gözlenen hatalar açıkça modellenemeyeceği için sorun teşkil etmemektedir.

GPS gözlemi, $P_j^{\dot{i}}$ alıcıdan j (altsimge, yeryüzünden) uyduya i (üstçizgi, uzaya) modellenmektedir.

$$P_j^i = c\left(T_j - \overline{T}^i\right) + B_j^i \tag{2.8}$$

Çünkü özel görelilik ve genel görelilik modelde her terimin bir referans çerçevesine göre tanımlanması gerektiğini kanıtlar. Bundan dolayı T_J, sinyal alma ile çakışan alıcı saatine göre olan zamandır. $\overline{T}^i$ uydu saatinin sinyal yayımlanması ile çakışan zamandır. B_j^i gözlem türü ile ilişkili olup değişmeyen hatadır. c, ışığın boşluktaki değişmeyen hızıdır. Ayrıca bu gözlem T_j zaman etiketindeki epokta kaydedilmiştir.

Saat farkları dört zaman farkının toplamı olarak şu şekilde yazılabilir.

$$P_j^i{}_{=}c\left\{\left(T_j - t_j\right) + \left(t_j - t^i\right) + \left(t^i - \overline{t}^i\right) + \left(\overline{t}^i - \overline{T}^i\right)\right\} + B_j^i \tag{2.9}$$

t_j alıcıdaki koordinat zamanı, t^i uydudaki koordinat zamanı, $\overline{t}^i$ uyduda kaydedilen mükemmel zaman olarak tanımlanır. Koordinat Zamanı, modelleri hesaplamak için kullanılan zaman ölçeğidir.

Bu amaçla uygun zaman ölçeği Terrestrial Dynamical Time (TDT), Uluslararası Atomik Zamanı (International Atomic Time – TIA) içerir. Fakat burada GPS zamanını seçmek en uygunudur. Şunu unutmamak gerekir ki bütün bu zaman ölçekleri UTC

(Coordinated Universal Time - Eşgüdümlü Evrensel Zaman) ile aynı oranda, zaman birimi olarak SI "Uluslararası Birim Sistemi SI" (Sisteme International d'Unites-SI) saniyesi ile çalışılır. Böylece bütün geleneksel zaman katsayıları saniye sıçramaları ile ayrılır.

Dörtlü zaman farkı 2.9 nolu formüldeki gibi yazılabilir. Alıcı saat zamanı ve koordinat zamanı arasındaki fark alıcı saat hatasıdır. Bağımsız parametre olarak her epokta τ_j olarak tanımlanır (T_j nin her değeri için). Saat hatası, alıcı saatinin jeodezik lokasyonuna göre saat hatalarının toplamını ve küçük bağıl hataları içerir.

Işık zamanı eşitliği olarak bilinen ikinci terim ise (2.9), alıcıdaki ve uydudaki koordinat zaman farkıdır.

$$c\left(t_j - t^i\right) = r_j^i \sum_{prop} \Delta r_{prop_j^i} = \left|r_j\left(t_j\right) - r^i\left(t^i\right)\right| + \Delta r_{GR_J^i} + \Delta r_{ion_J^i} + \Delta r_{trop_J^i} + \Delta r_{pcv_J^i} + \Delta r_{circ_J^i} + \cdots \quad (2.10)$$

r_j^i, uydu ve alıcı arasındaki Öklid uzaklığıdır. $\Delta r_{prop_j^i}$ uydu ve istasyon geometrisinden kaynaklanan çeşitli gecikmeleri (uzay-zaman eğriliği kaynaklı *genel görelelik*), iyonosfer, troposfer ve anten faz merkezi çeşitleri; dairesel polarizasyon etkileri ve diğer yayılma terimlerini gösterir), r_j sinyal karşılama zamanındaki jeosentrik alıcı konumu, r^i iletme zamanındaki jeosentrik uydu konumudur.

Referans çerçevesi, Konvansiyonel Yer Merkezli Çerçeve (The Conventional Earth Centered Inertial Frame-ECI) olarak alınmış, ışık-zaman eşitliği için J2000 kullanılmaktadır. ECI dünya ile birlikte dönmediği, hareketsiz olduğu için, ışık hızı bütün yönlerde sabittir.

Eğer hedef uydu yörüngelerinin tahmin edilmesiyse ECI çerçevesi, uydu hareket eşitliklerinin entegre edilmesine en uygun çerçevedir. Işık zaman eşitliğini, yeryüzü merkezli, yeryüzü sabit (ECEF-rotating, Earth-Centered, Earth-Fixed) bir sistemde, ECEF çerçevesinde uydu yörünge pozisyonu, hızı dağılmış olarak verilmelidir. Bu durumda, (denklem 2.10) Sagnac etkisinin hesaplanması gerekecektir. Sagnac etkisi ECEF ile, ışık yayılımında yeryüzünün dönmesinin etkisidir. Bunun üstesinden gelmenin en iyi yolu, ECEF ve ECI'nin sinyal alım anında hizalanmış olmasıdır.

ECI çerçevesinde uydu hızının hesaplanabilmesine ihtiyaç vardır. Bu hız, uyduda dünyanın dönüşünden kaynaklanan hıza ECEF hızının eklenmesi; ECI hızını kullanarak uydunun sinyalin yayımlanma zamanındaki ECI pozisyonunun hesaplanmasıyla elde edilir. Bu yüzden sagnac etkisi, yeryüzü dönmesine getirilen bir düzeltme olarak kabul edilir. Genel bağıl gecikme şu şekilde hesaplanabilir:

$$\Delta r_{GR_J^i} = \frac{2GM_\oplus}{c^2} \ln \frac{r_j + r^i + r_i^j}{r_j + r^i - r_i^j} \tag{2.11}$$

$2GM_\oplus$ yeryüzü yerçekimi sabiti genelde, r ≡ r şeklindedir. Bu değere bazen "Shapiro Gecikmesi"de denilmektedir. Orta yörüngedeki uydulardan alınan sinyaller, tipik olarak 10 mm seviyesindedir. Bu sinyalin yolculuk ettiği uzaklığa bağlıdır. Öklid uzaklığından daha fazla bir uzaklık olduğu durumda bu durum yeryüzünün çekim alanında uzay- zaman eğriliğine sebep olur. (2.11) eşitliği yeryüzü çekim potansiyeline düz ışık yolu potansiyelindeki etkisinin entegre edilmesiyle türetilmiştir. Yalnız buradaki "uzay- zaman eğriliği" göz ardı edilebilen, ışık yönünde yerçekimsel olarak yerçekimi yönünde kırılması ile karıştırılmamalıdır. Burada eğrilik sinyalin izlediği yol boyunca uzayın esnemesi olarak düşünülebilir.

Anten etkileri $\Delta r_{pcv_J^i}$ anten merkezi çeşitleri; $\Delta r_{circ_J^i}$ dairesel polarizasyon gibi araştırılan ve uygulanan etkiler konum doğruluğunun arttırılmasında önemli bir etkiye sahiptir. GPS uydusu ve istasyon antenleri için anten kalibrasyonları IGS'ten sağlanabilmektedir.

İyonosferik gecikme, taşıyıcı dalganın frekansının karesiyle ters orantılı olarak modellenebilir.

$$\Delta r_{ion_J^i}(f) = \mp k \frac{TEC_J^i}{f^2} \tag{2.12}$$

şeklindedir.

Pozitif işaret *pseudorange*, negatif işaret taşıyıcı faz gözlemlerinde kullanılır. Toplam elektron içeriği (*Total Electron Content*,TEC) güneş radyasyonu ile harekete geçen gün boyunca sürekli değişken olup coğrafi lokasyona son derece duyarlıdır. Sabit k ise plazmalardaki elektromanyetik dalga yayılımı teorisinden türetilmiştir. GPS frekanslarındaki gecikmeler ekvatora yakın bölgelerde 100 m büyüklüğüne ulaşmaktadır, yersel zamana göre 2 pm olabilmektedir. Orta enlemlerde, gece yarısı ve şafak vakti cm seviyesine düşmektedir. Milimetre büyüklüğündeki yüksek dereceli

terimler ihmal edilir fakat günümüzdeki araştırmalarda birçok temadan biri olarak modellenebilmektedir. Gözlemlerin lineer kombinasyonları frekansın karelerini elimine etmektedir. Aslında, taşıyıcı fazın kombinasyonu:

$$LC = \frac{f_1^2 L1 - f_2^2 L2}{(f_1^2 - f_2^2)}$$

$$\cong 2.546\, L1 - 1.546\, L2 \tag{2.13}$$

şeklindedir.

Bu nedenle, k den TEC "*ionosphere–free*" verisini hesaplamak için gerekli değildir. Katsayılar, GPS sinyallerinin sahip olduğu özelliklere göre $f_1 = 154$, $f_2 = 120$ olarak alınabilmektedir.

Eğer iyonosfer, jeofiziksel bilimsel bir hedef ise, iki farklı frekanstan fark almak geometriden bağımsız bir gözlem sağlayabilir.

$$PI = P1 - P2$$

$$= k\, TEC\, \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}\right) + bias \tag{2.14}$$

şeklindedir.

Bu metot yerküre üzerine yerleştirilmiş GPS istasyonları kullanılarak rutin olarak iyonosferik TEC haritası yapmak için kullanılır. Bu yöntemin faydalı bir yanı uzun süreli değişkenliği izlenebilen ve belirsizlik çözüm algoritmalarına girdi olarak kullanılabilen, L1 ve L2 frekansında gözlemler arasında tahmin yapma olanağı sağlamasıdır.

Troposferik gecikme ise tamamıyla yayılmayan GPS L bant frekansında ve farklı açıdan ele alınmalıdır. Yersel meteorolojik gözlemlerde troposferik gecikmeyi modellemek prensipte mümkün olsa da; pratikte yeterli doğrulukta olduğu kanıtlanamamıştır. Troposferik modellemede zenit gecikmesinin tahmin edilebilmesindeki başarı; Z (zenit gecikmesi) ve düşük yüksekliklerdeki gecikme arasındaki farkın doğru bir şekilde modellenebilmesidir. Örnek olarak;

$$\Delta r_{trop_j^i} = \frac{z_j}{\sin \varepsilon_j^i} \tag{2.15}$$

şeklindedir.

Yükseklik açısının ters işaretlisi, troposferin yeryüzü üzerinde yatay bir şekilde uzandığı varsayılarak üretilen ‘mapping function’ bunun en basit örneğidir. Bu model ε< 20° den sonra işlevini yitirmektedir. Daha doğru modelleme “mapping function”ın yeryüzü eğriliği ve farklı karakteristik ölçek yüksekliklerine (~10 km ve ~2 km, sırasıyla) sahip kuru ve yaş bileşenleri bölümleyerek modifiye etmektir.

$$\Delta r_{trop_j^i} = \Delta r_{dry_j^i} + \Delta r_{wet_j^i}$$

$$= Z_{dry} F_{dry}(\epsilon_j^i) + Z_{wet} F_{wet}(\epsilon_j^i) \qquad (2.16)$$

şeklindedir.

GPS ve VLBI ile yükseklik belirlemenin kalıtsal zayıflığından dolayı “mapping functions”ı doğru modelleyebilmek her zaman araştırmaların konusu olmaktadır. Islak kısımdaki gecikme elektromanyetik dalgaların su molekülünün statik kutbuyla iletişime geçmesinden kaynaklanmaktadır. Kuru taraftaki gecikme, atmosferdeki bütün molekül bileşenlerinin biraz suyun da katkısıyla, elektro manyetik dalga tarafından dinamik dipole ün uyarılmasından kaynaklanır. Kuru ve yaş gecikmelerin tipik değerleri sırasıyla 2,1 ve 0,1 m den yaklaşık 10 cm’e kadardır.

Kuru bileşen alıcının yüksekliğine göre hidrostatik baskının bir fonksiyonu olarak modellenebilir. Meteorolojik verinin yokluğunda nominal değerler, nominal yer basıncını deniz seviyesinde kabul ederek yükseklik için gelen düzeltmenin çıkartılmasıyla hesaplanabilir. Burada basıncın yükseklikle birlikte azaldığı kabul edilir. Islak bileşenin nominal değeri 0 (sıfır) olarak kabul edilir. Z_{wet} GPS verisi ile birlikte konum belirleme çözümü için daha sonra tahmin edilir. Bu durumda $Z_{wet}{}'$in tahmin edilen değeri Z_{dry} nominal modelinde görünen bütün belirgin yetersizlikleri elemine etmektedir. Söz konusu durum yüksek hassasiyetli GPS jeodezisinin standart metodu olmasına karşın yaklaşımın kısıtlılıkları araştırmaların konusu olmaktadır.

Troposferik gecikme sadece jeodezik konum belirleme için değil aynı zamanda troposfer çalışmaları için de önemlidir. Bahse konu gecikme, hava tahmini ve iklim modelleme çalışmalarına girdi olarak kullanılan atmosferdeki su buharına dönüştürülebilir. Bu uygulama için, yüzey meteorolojik verisi, kuru ve ıslak bileşenlerdeki gecikmelerin doğru bir şekilde bölümlendirilmesi önemlidir.

Işık zaman eşitliğine dönersek, mükemmel yayılma modellerine sahip olsakta ışık zaman eşitliğinin basitçe hesaplanmasından ziyade iteratif olarak çözülmesine ihtiyaç

vardır. Çünkü sinyalin yayınladığı koordinat zamanı olan t^i nin nominal değerine sahip değildir. Prosedür şu şekilde;

- Gözlem zaman etiketi ile başlarsak T_j, sinyal kabul alış-varış koordinat zamanını hesaplamak için; 2.9. eşitlik ve alıcı saat hatası t_j kullanılır. Burada kabul edilen saat hatası, geometrik aralığındaki sonraki hesaplamayı etkilediği için iteratif tahmine ihtiyaç duyulmaktadır.
- t_j zamanında verilen modellenmiş istasyon pozisyonu r_j; t^i koordinat zamanı fonksiyonu olarak, modellenmiş uydu pozisyonları r^i tablosu ile iletim koordinat zamanı iteratif olarak,

$$ct^j[n+1] = ct^j[n] + \frac{ct^j[n] - r_j^i[n] - \sum_{prop} \Delta r_{prop_j^i}[n]}{1 - \dot{r}^i[n].\widehat{r_j^i}[n]/c} \tag{2.17}$$

hesaplanır. Burada $\widehat{r_j^i} = \boldsymbol{r}_j^i \;/\; r_j^i$ alıcıdan uyduya olan yönün kosinüsüdür. nth iterasyonu daha iyi anlayabilmek için, örnek olarak; uydu pozisyonu r^i ve ECI hızı $\dot{r}^i$ zamanla interpolasyon yapılmıştır $t^i[n]$. Bu denklem sayesinde çok hızlı bir şekilde yakınsanır. Yayımlanma zamanını, iletim zamanı olarak başlatmak yeterli olacaktır $t^i[0] = t_j$.

ECI çerçevesinde (J 2000) olunca alıcı pozisyonu için dünyanın dönüşü ve yeryüzünün jeofiziksel hareketleri de hesaba katılmalıdır.

$$r_{j(t_j)} = PNUXY\left[x_{0_j} + \sum_k \Delta x_{k_j}(t_j)\right] \tag{2.18}$$

PNUXY; presesyon, nutasyon, dönme oranı ve polar hareketi hesaba katan çoklu 3x3 dönme matrisidir. Parantez içine alınan terim; ITRF olarak bilinen, uluslararası yeryüzü sabit yersel referans çerçevesinde alıcının pozisyonunu gösterir. Bazı konvansiyonel epoklarda, ITRF sisteminde istasyon koordinatları belirlenmiş olan x_{0_j}, konvansiyonel istasyon konumudur. $\Delta x_{k_j}(t_j)$, k ile gösterilen plaka tektoniği ve katı yeryüzü gelgitleri gibi jeofiziksel olaylar (process) dan dolayı epok pozisyonlarındaki yer değiştirmeyi gösterir. Orijinal gözlem eşitliği (2.8) e dönersek, 3. terim koordinat zamanı ve uydudaki uygun zamanı arasındaki farktır. Özel göreceliliğe göre GPS uydu saati yeryüzündeki gözlemciye göre daha yavaş hareket eder. Tersi olarak, (kütleçekim maviye kayma) yerçekimi kuyusuna düşerken fotonların enerji kazanmasıyla birlikte, genel görecelikte uydu saatlerinin yeryüzünden daha hızlı gözlendiğini tahmin eder. Bu iki etki tamamıyla yok edilemez. Genel ve özel göreliliği

hesaplayabilmek için uygun GPS tasarımı ile uydu saati 10.23 MHz den çok az düşük frekanslı çalışır. Böylece frekansları 10.23 MHz olarak yeryüzünden gözlenir ve rölatif terim

$$\left(t^{i} - t^{-i}\right) = 2r^{i}\left(t^{i}\right).r^{\imath}\left(\dot{t}^{\imath}\right)/c^{2} \tag{2.19}$$

olmaktadır.

Eşitliğinin ECI ya da ECEF çerçevesinde hesaplanıp hesaplanmadığı önemsizdir. Bu sonuçta ek rölatif etkileri göz ardı edilmektedir. Nokta kütlesinin eliptik yörüngede olduğu varsayılmıştır. Dördüncü terim uydudaki saat zamanı ile proper time arasındaki farktır. Uydu saatindeki negatif hatadır:

$$(\overline{t^{\imath}} - \overline{T^{\imath}}) = -\tau^{i} \tag{2.20}$$

şeklindedir.

İstasyon saatindeki hataların aksine, uydu saatindeki hatalar modeldeki geometrik açıklıktan etkilenmezler (ışık zaman eşitliği). Bu yüzden modelin geliştirilmesine ihtiyaç duyulmamaktadır. Fakat gözlemin kendisini etkilemektedir. Alıcı pozisyonunun tahmininde hataya sebep olan uydu, saat hatalarından sorumlu değildir. Uydu saat hataları atomik olmasına rağmen, jeodezik uygulamalarda zaman içinde ileriyi tahmin edebilmek için yeterince sabit değildir. Bu yüzden bu terim her epokta konum belirleme çözümünün bir parçası olarak bağımsız şekilde tahmin edilmektedir. Veya alternatif olarak, bu parametreyi elemine edebilmek maksadıyla gözlem eşitliklerinin, alıcı gözlem çiftiyle arasındaki fark alınabilir. Sonuç olarak, bağımsız istasyonların jeodezik kalitesi PPP mevcut bir sorun olarak şimdiki araştırmaların konusudur.

Her gözlem tipinin kendine has bir hatası vardır. Tipik olarak alıcılar, bu hataların kalibre edilmesi ve zaman içinde sabit hale gelmesinin sağlanması üzerine dizayn edilmiştir.

Uydu saat hatası gibi durumlarda bu hatalar hesaplanan geometrik dizi üstünde hiç bir etkisi yoktur ve dolayısıyla bilinmesine ihtiyaç yoktur. Fakat gözlemlerin içerisinde hatalar bulunduğu için EKK yöntemindeki parametreler ile düzeltilmediğinde konum doğruluğunu etkilemektedirler. Gözlem tipleri arasındaki hatalar konum belirleme amaçları için göz ardı edilebilir. Çünkü istasyon ve uydu saat hata parametreleri EKK konum belirleme çözümünün bir parçası olarak yok edilebilir. Fakat doğru zamanlama

amacı için, özel durumlarda bu tarz hatalar kalibre edilmelidir. Ana GPS analiz merkezleri tarafından gözlemler arası hataların bir kısmı takip edilmekte ve gerektiğinde hazır olarak tutulmaktadır. Jeodezik aplikasyonlar için en önemli hata taşıyıcı faz hatalarıdır.

Taşıyıcı faz hatası modellerden tahmin edilememekle birlikte bazen tam sayı atlamaları yapmaktadır. Çift farklar yöntemi tam sayı belirsizliğine sahiptir. İlk çözüm olarak, taşıyıcı faz hataları ışık zaman eşitliğinden etkilenmediği için sıfır "0" olarak kabul edilir. Sonrasında, gerçek değerler olarak tahmin edilebilirler.

Eğer gerçek değerli taşıyıcı faz hata parametreleri yeteri kadar doğruysa daha sonrasında çift farklar alınarak tam sayı değerleri düzeltilir. Daha sonra söz konusu değerleri sabit tutularak hesaplanmasıyla çözüm sağlanır. Ya da daha da etkili olanı en küçük kareler dengeleme teorisinin kullanılarak hesaplanmasıdır (Blewitt, 2015).

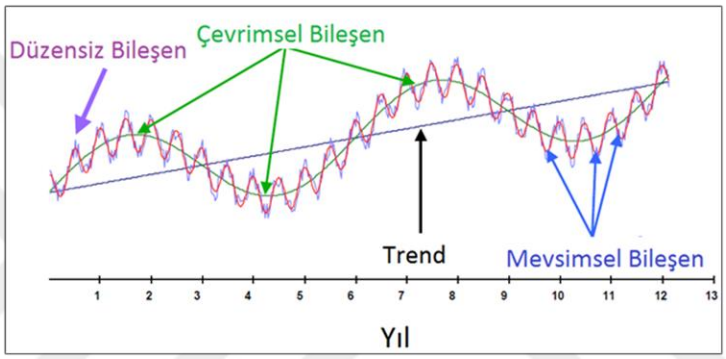
PPP gibi, farklar alınmadan veri analizinde belirsizlik çözümü bir bilinmez olarak kalmaktadır. Bu problemin çözümü, fark olmadan faz hatalarının sabitliğinde yatmaktadır. Faz hataları tahmininde çift farklar tam sayı devir sayısını çözebilir. PPP yönteminde, tek alıcı ile en az bir diğer istasyonun aynı uydulardan hata tahminlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bertiger ve arkadaşları tarafından gösterilen ve önerilen "Wide-Lane ve Phase Hata (WLPB) methodu" olarak bilenen yöntem başarılı bir metot olarak son zamanlarda kullanımdadır. GPS uydu yörünge tahmin prosedürüne göre WLPB metodu IGS ağı için hataları tahmin eder. Bu faz hata tahminleri GPS yörünge ve saat parametreleri ile birlikte tek alıcılı kullanıcılarının kullanımına hazır hale gelir. Bu sayede kullanıcı, tek alıcı ile PPP yönteminde, belirsizlik çözümlemesi sağlayabilmektedir.

2.5 GNSS Zaman Serileri

Zaman serileri, belirli zaman aralıklarında düzenli olarak arşivlenmiş gözlemler tarafından oluşturulan verilerdir. Uygulamada tam olarak sağlanamasa da zaman serilerinde veri kaydetme aralığı eşit kabul edilmektedir. Bu kabul analiz aşamasında problemler oluşturabilmektedir. Özellikle ekonomi alanında öne çıksa da zaman serileri toplumun tüm kesiminde kullanılabilmektedir. Zaman serilerinin amacı geçmiş değerler hakkında araştırmacıyı fikir sahibi yapıp ileriye dönük tahmin yapmasına (5-20 yıl sonrası için) yardım etmektir. Zaman serileri parametrelerin kendisi ve zaman

ile ilişkisini yorumlamaktadır. Regresyon analizi ile çokça karıştırılan bu terim, zaman serilerinin bağımlı ve rasgele olmayan değişkenleri ile regresyondan ayrılmaktadır (Şanlıoglu ve Kara, 2014; Akarsu, 2012; Kara, 2009).

Mann (1995)'e göre klasik bir modelde zaman serisi trend, mevsimsel, devresel, rassal olmak üzere 4 bileşenden oluşmaktadır. Trend bileşeni, zaman serisinin uzun zaman aralığında artma veya azalma şeklinde gösterdiği değişimdir. Mevsimsel bileşen, zaman serisinde kısa dönemde veya mevsimlere göre meydana gelen değişimdir. Devresel bileşen, mevsimsel değişimle alakası olmayan daha uzun zaman aralığındaki dönemsel değişimdir. Rassal bileşen ise oluş nedeni belli olmayan değişimdir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6: Zaman Serilerini Oluşturan Bileşenlerin Grafik Üzerinde Gösterimi.

Zaman serilerinin doğru bir şekilde analiz yapılabilmesi için içerdiği bileşenlerin tanımlanması gerekmektedir. Bir seriyi bileşenlerine ayırmak için kapsadığı dört bileşen arasında belli bir ilişki bulunduğu varsayılmalıdır Genellikle izlenilen yol bir zaman serisinin birkaç bileşenini toplamı ya da çarpımından meydana geldiği varsayımıdır (Akalın 1990). Bu varsayıma göre Denklem (2.21) elde edilmiştir.

$$Y = f(T).f(C).f(S).f(I) \tag{2.21}$$

Y: Zaman Serisi Genel Formülü

$f(T)$: Trend Bileşeni Fonksiyonu

$f(C)$: Devresel Bileşen Fonksiyonu

$f(S)$: Mevsimsel Bileşen Fonksiyonu

$f(I)$: Rassal Bileşen Fonksiyonu

Özetlemek gerekirse, zaman serileri verilerin geçen süreye göre takibine yardımcı olmaktadır. Veri analizinde yapılacak istatistiksel yorumun geçerli olabilmesi için söz

konusu değerlerin tekrarlı olarak ölçülmesi gerekmektedir. Trendin incelenmesi ile gözlem verilerinin zaman içindeki değişimleri izlenir. Bahse konu seri uzun vadede sabit bir eğilim gösterirse zaman serisinde "trend bileşeni" var demektir. Trendin tespit edilmesinde EKK yöntemi kullanılarak doğru veya eğri denklemi ile bahse konu bileşen seriden ayrıştırılır (Şanlıoglu ve Kara, 2014).

2.5.1 Zaman serisinin sonuçlarını etkileyen faktörler

Zaman serisinin değerlerini dolayısıyla sonuçlarını etkileyen faktörler bulunmaktadır. Bunlardan ilki uydu etkisidir. Uydu yörünge belirlenmesinde kütle çekimine bağlı etkiler kolaylıkla modellenebilirken çekime bağlı olmayan ivmelenmeyi modellemek hala üzerinde çalışılan bir problemdir. Çünkü jeodezik parametreler, uyduların güneş ışınlarına olan duyarlılığı göz önüne alındığında, radyasyonla yüksek korelasyonludur. GPS uydularındaki reflektörlere lazer pulsu göndermek suretiyle yapılan analizlerden bu sonuca ulaşılmıştır (Kara, 2009).

İkinci etki uzun dönemli sinyal yansıma etkisidir. Uyduların her biri, iki değişik frekansta ve düşük güçlü radyo sinyalleri yayınlamaktadır. (L1, L2) Bu sinyaller bulutlardan, camdan ve plastikten geçebilir ancak duvar ve dağ gibi katı cisimlerden geçemez. Bu da sinyallerin şehir içinde hassasiyetinin düşmesi anlamına gelmektedir. Frekansın yeterli olmadığı veya yansıtıcı yüzeyin etkin olduğu yerlerde hata oranı da artmaktadır. Üçüncü etki atmosfer etkisidir. GNSS radyo dalgaları kullanmaktadır. Atmosferin yere yakın troposfer katmanında radyo dalgaları özellikle su buharı nedeniyle gecikmeye uğrarlar. Troposferik etkiler, GPS çözümlerinde çiftli fark taşıyıcı faz gözlemleri kullanılarak etkili bir şekilde azaltılamayabilir. Bu sebeple, atmosferdeki mevsimsel etkiler ve anlık değişmeler nedeniyle, zaman serileri sonuçlarında beklenmedik etkiler doğurabileceği söylenebilir. Dördüncü etki, okyanusa yakın GPS istasyonlarında kabuk deformasyon ölçülerini etkileyen okyanus yüklenme etkisidir. Beşinci etki olarak karşımıza donanımsal etki çıkmaktadır. Bu etki istasyondaki tüm ekipmanlar ile ilgili olsa da bu etkinin ortaya çıkmasındaki temel faktör antenlerdir. Bu denli önemli ekipmanların korunumu için kurulan sistemler bazı durumlarda sinyal iletilmesine mani olabilmektedir. Bu sebeple kullanılan donanımların sürdürülebilirliği zaman serileri için önem teşkil etmektedir. Bunların dışındaki etkiler yerel meteorolojik etki, mevsimsel etki, deprem etkisi ve plaka hareketleri olarak sıralanabilir.

Bu çalışmada kullanılan koordinatlara ait zaman serileri, 2000'den fazla Dünya üzerine dağılmış GPS istasyonundan elde edilen verileri işleyerek analiz eden ve yayımlayan JPL'in "*ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/usrs/mbh/point/*" sitesinden elde edilmiştir. Bahse konu zaman serileri hassas nokta konum belirleme yöntemiyle elde edilmekte olup, faz belirsizliği giderilmekte ve tüm koordinat bileşenlerinde konumlar elde etmek için dönüşüm parametreleri uygulanmaktadır. JPL'de zaman serilerinin değerlendirilmesi GIPSY yazılımı ile gerçekleştirilmektedir.

Yüzey yer değiştirme veya gerilim ölçümlerini kullanan jeofiziksel çalışmalar, sadece parametrelerin değil hataların da doğru tahminlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu tahminlerin doğruluğu koordinat bileşenlerinin doğrusal eğilim hakkında ortalama karesel hatasıyla tanımlanan tekrarlanabilirliği ile değerlendirilir. Yer hızları genellikle her koordinat bileşeninin lineer regresyonu ile belirlenir. Hızı tahmin etmek için EKK tekniği kullanılır. Koordinat zaman serileri bu tezde; istatistiksel olarak normal dağılımlı varsayılmış yıllık ve yarı yıllık trend, mevsimsel periyodik etkiler hesaba katılarak EKK yöntemiyle değerlendirilmiştir.

2.5.2 GPS zaman serilerinde yıllık sinyallerin jeodezik hız üzerindeki etkisi

Jeodezik koordinat zaman serilerinden türetilen hızlar, plaka sınır dinamikleri, buzul sonrası çekilmesi, yüzey kütle yüklemesi ve global deniz seviyesi değişimi gibi jeofiziksel modellere girdi olarak kullanılmaktadır. GPS koordinat zaman serilerinin birçok değişken sinyale sahip olduğu ve hız tahminlerini ciddi bir şekilde saptırabileceği ortaya konmuştur. Aslında, yıllık olarak tekrarlanan bileşen ile mevsimsel olarak yönlendirilen sinyaller, tüm harmonik frekanslarda GPS hatalarının hem spektral hem de zaman etki karakterizasyonunu etkileyecek güce sahiptir (Blewitt ve Lavallée, 2002).

Yıllık sinyallerin önemli bir bileşeni gerçek fiziksel yer hareketi olarak bilinmektedir. Küresel bir referans çerçevesine göre bunun ana nedeni, hidroloji ve atmosferik basınçtan kaynaklı yüzey yüklemesidir (Blewitt ve Lavallée, 2002).

Van Dam ve diğ. (2001) yaptığı kıtasal su yüklemesine bağlı olarak kabuk yer değiştirmelerine ilişkin çalışmada, kıtasal su depolarının yük modellerinde düşey yer değiştirme kare ortalamalarının kökü (RMS, *root mean square*) değerlerinin yaklaşık olarak 8 mm büyüklüğünde ve ağırlıkla yıllık karakterde olduğu ifade edilmiştir.

Blewitt (2015) tarafından yapılan, yıllık sinyallerin jeodezik hız üzerindeki etkisini inceleyen diğer bir çalışmada ise GPS yükseklik farklarındaki varyans azalmasının, Van Dam vd.(2001) yaptığı çalışmada kullanılan modelin varyansına eşit olduğu belirtilmiş olup, söz konusu modelin (atmosferik yüklemeyi de göz önünde bulunduran) çalışmada kullanılan aynı GPS koordinat zaman serileri ile kuvvetli şekilde korelasyon gösterdiği tespit edilmiştir. Çalışmanın sonucunda, özellikle kısa süreli verilerde deterministik bir modelle tanımlanan mevsimsel değişimin, global referanslı koordinatlar için hız hatasına katkıda bulunmasının olası olduğu sonucu ortaya çıkmıştır.

Yıllık sinyallere (faz ve genlik) ait fiziksel modeller, gözlenen değişimi yeterli bir şekilde tanımlayana kadar bu sorunun makul bir çözümü; yıllık hız ve sinyal hızını aynı anda, alan hızları ve başlangıç pozisyonları ile birlikte tahmin etmektir (Van Dam ve diğ, 2001).

Kuzey Amerika - Pasifik plaka sınırı gibi büyük bölgeler veya büyük plakaların kararlılık testleri için etkili olan bir başka strateji ise; mekânsal filtreleme ile bölgesel olarak koordinatlara referans vermektir.

Yıllık sinyaller hesaba katılmazsa;

- Koordinat zaman serisinin ilk 2,5 yılı boyunca tipik olarak hız hatalarında baskın unsuru oluştururlar.
- Jeodezik araştırmalar doğru bir global referans çerçevesinin mevcudiyetine dayanır.
- Yıllık tekrarlanan sinyaller genellikle sadece yıllık sinüzoidal bileşenleri değil yıllık harmonikleri de içerir. Bu nedenle yalnızca yıllık genlik ve fazın tahmin edilmesi, yıllık tekrarlanan bir sinyalin tüm etkisini hafifletmez. Ekstra terimlerin ne kadar çok olduğu açıkça belli değildir (Blewitt ve Lavallée, 2002).

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

GPS, yer yuvarı global deformasyonlarının belirlenmesinde kullanılan bir araçtır. Özellikle kabuk deformasyonunun belirlenmesi, buzul sonrası erimenin izlenmesi ve Uluslararası Yersel Referans Sisteminin (ITRF, *International Terrestrial Frame*) sıklaştırılması konularında GPS'ten yararlanılmaktadır. Ancak, her zaman sabit GPS (SGPS) istasyonu kurma şansı olmadığından dolayı; kampanya ölçümlerine de sıklıkla başvurulmaktadır. Halihazırda var olan kampanya ölçümlerinden hız belirleyen GPS prosedürleri yeterli doğrulukta hız üretememektedir (Akarsu ve diğ, 2015). Bu çalışmada, doğru hız bilgisi üretilebilmesi için, GPS veri ürünleri ile jeodezik ve jeofiziksel araştırma faaliyetlerine destek sağlayan IGS'ten faydalanılmıştır.

IGS'in websitesinde (*www.igs.org*) belirtildiği üzere toplam 504 adet IGS istasyonu bulunmaktadır. Söz konusu noktalar ile ilgili araştırmanın tutarlı olabilmesi adına konuyla ilgili diğer araştırmalar incelenmiştir. Akarsu (2012)'nun çalışmasında, 8-12 saatlik oturum süreli GPS ölçümleri ile 24 saatlik oturum süreli GPS ölçümlerinin karşılaştırması neticesinde elde edilen yükseklik bileşeninin R^2 değerlerinin sıfıra yakın olduğu noktalarda düşük kalite olması bulgusu, bu çalışma için istasyon seçiminde dikkat edilen en önemli kriteri oluşturmuştur. Bu sebeple, yükseklik bileşenine ait belirleme katsayısı (R^2) değerlerinin yüksek olmasına, başka bir deyişle zaman içinde sabit bir eğilim göstermesine dikkat edilmiştir.

R^2 değerleri, model tarafından açıklanan kestirimdeki değişimin oranı olarak yorumlanır. 0 ile 1 arasında değişen değere sahiptir. R^2 in "0" olması, modelin kestiriminde herhangi bir değişkenliği açıklamadığını gösterir. "0,50" den büyük R^2 değeri ise genellikle anlamlı bir ilişki olarak kabul edilir.

Bu kapsamda, çalışmada R^2'i yaklaşık olarak 0,85'ten büyük olan istasyonlar ile çalışılmasının daha uygun olacağı öngörülmüş ve R^2 değeri denklem 3.1'e göre hesaplanmıştır.

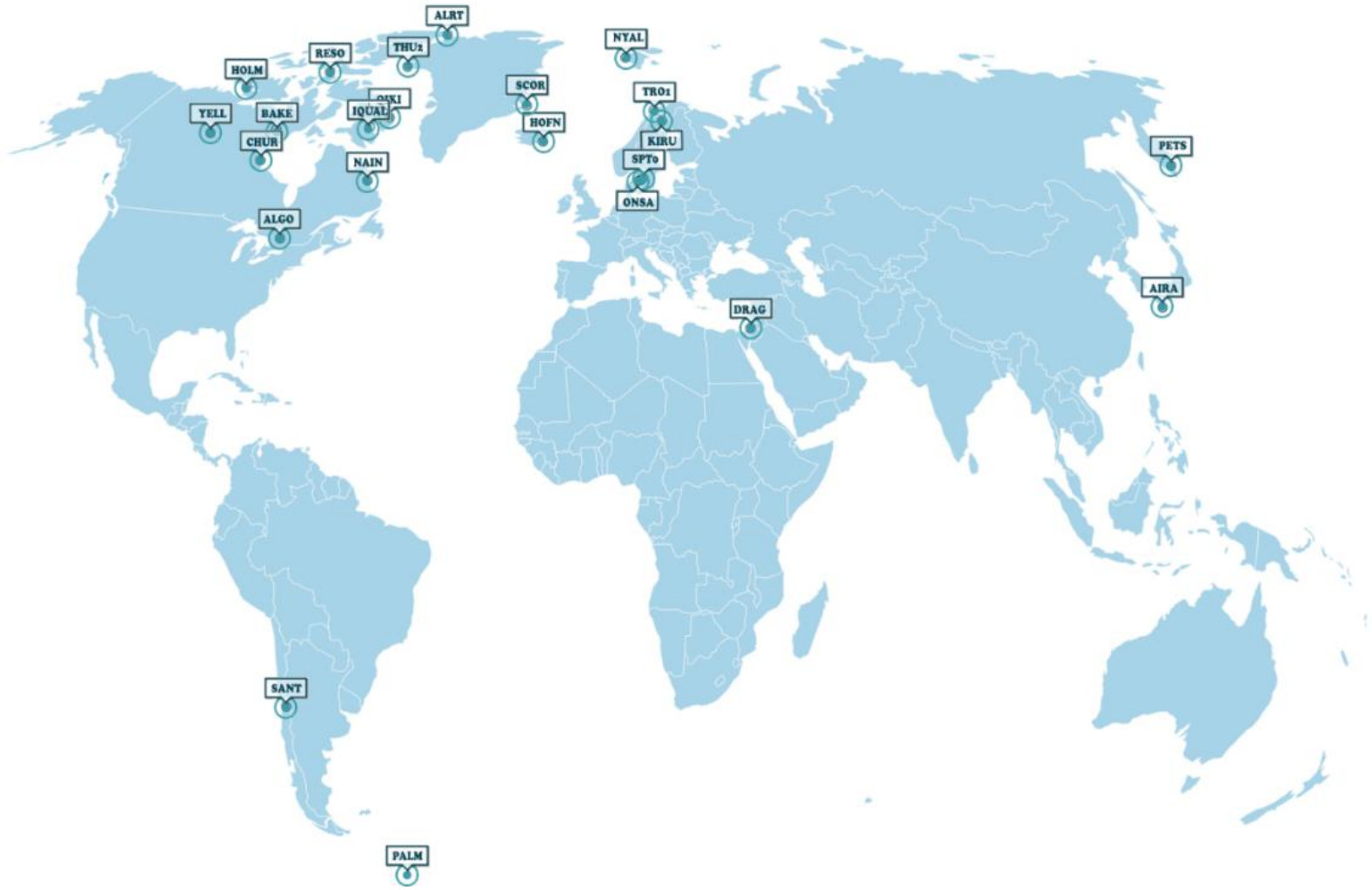
$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} \hat{v}_i^{\,2}}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \quad (3.1)$$

Burada, x_i, gözlemlenen değer, $\hat{x}_i$ formülden elde edilen değer, $\bar{x}$ değerlerin ortalamasıdır. Ayrıca nokta seçiminde, kaynakta verinin arşivlenmiş olması diğer önemli kriteri temsil etmektedir. Bunun yanında daha önce kampanya üzerine çalışmış olan Akarsu (2012)'nin noktalarının da bu çalışmada yer almasına özen gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan veri örneklemi, düşey sinyalin sorunsuz elde edildiği toplam 24 noktadan oluşmaktadır. Noktalar ile ilgili detaylı bilgi Çizelge 3.2'de yer almaktadır. Noktaların yeryüzündeki dağılımı ise Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

İstasyon seçim kriterleri;

- 1995-2017 yıllarını kapsayan, yaklaşık 22 yıllık bir zaman dilimine ait zaman serilerinin kullanılması,
- İncelemeye konu edilen noktalar kümesinin R^2'nin yüksek (> 0.85) olması,
- Noktaların her gün ve bir ocak gününe ait 22 yıllık sürede arşivlenen Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology (ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/usrs/mbh/point/) ftp time series'te arşivlenmiş olması dikkate alınarak belirlenmiştir.

Noktaların büyük bir kısmı kabuk hareketliliğin yoğun olarak gözlemlendiği kuzey yarım küreden seçilmiş olup, yeryüzünü tamamıyla kapsaması adına Afrika kıtasından DRAG noktası, Güney Amerika kıtasından ise SANT ve Güney Kutbu'ndan ise PALM örneklem noktaları tercih edilmiştir.



Şekil 3.1: Çalışmada Tercih Edilen IGS Noktalarının Dağılım Haritası.

Çizelge 3.1: Çalışmada Seçilen IGS Noktaları.

	Nokta	Şehir	Ülke	Ajansın Adı	Enlem	Boylam	Yükseklik (m)	Alıcı	Anten	Saat	Uydu Sistemi
1	PALM	Palmer Station	Antartika	Jet Propulsion Laboratory	-64.7750898	-64.0511218	31.2394	ASHTECH UZ-12	ASH700936D_M	INTERNAL	GPS
2	ALRT	Alert (Ellesmere Island)	Kanada	NRCan, Geodetic Survey Division	82.4942944	-62.3404611	78.11	ASHTECH UZ-12	ASH701945D_M	INTERNAL	GPS
3	BAKE	Baker Lake	Kanada	Natural Resources Kanada	64.3178194	-96.0023444	4.4	TPS NET-G3A	TPSCR.G3	INTERNAL	GPS+GLO
4	HOFN	Hoefn	İzlanda	Bundesamt fuer Kartographie und Geodaesie	64.2672778	-15.1868056	82.5	LEICA GR25	LEIAR25.R4	INTERNAL	GPS+GLO+GAL +SBAS
5	HOLM	Ulukhaktok, formerly Holman (Victoria Island)	Kanada	NRCan, Geodetic Survey Division	70.736.389	-117.761	39.5	ASHTECH UZ-12	ASH701945D_M	INTERNAL	GPS
6	IQAL	Iqaluit	Kanada	Natural Resources Kanada	63.7559639	-68.5104972	91.7	TPS NET-G3A	TPSCR.G3	INTERNAL	GPS+GLO
7	NYAL	Ny-Alesund	Norveç	Norwegian Mapping Authority	78.9300000	11.8700000	82	TRIMBLE NETRS	AOAD/M_B	EXTERNAL H-MASER	GPS
8	PETS	Petropavlovsk-Kamchatka	Rusya	RDAAC	53.0233000	158.6501361	102.2	ASHTECH Z-XII3	ASH701933B_M	INTERNAL	GPS
9	QIKI	Qikiqtarjuaq (Baffin Island)	Kanada	NRCan, Geodetic Survey Division	67.5593333	-64.0336667	13.3	ASHTECH UZ-12	ASH701945E_M	INTERNAL	GPS
10	RESO	Resolute (Cornwallis Island)	Kanada	NRCan, Geodetic Survey Division	74.6908000	-94.8933000	34.9	ASHTECH UZ-12	ASH700936A_M	INTERNAL	GPS
11	SCOR	Scoresbysund/Ittoqqoor miit	Grönlend	DTU Space	70.4853333	-21.9503361	128.5	ASHTECH UZ-12	ASH701941.B	EXTERNAL RUBIDIUM	GPS
12	THU2	Thule Airbase	Grönlend	DTU Space	76.5370000	-68.8250000	36.1	LEICA GRX1200+GNSS	ASH701073.1	EXTERNAL RUBIDIUM	GPS+GLO
13	TRO1	Tromsoe	Norveç	Norwegian Mapping Authority	69.6627222	18.9396389	138	TRIMBLE NETR8	TRM59800.00	EXTERNAL RUBIDIUM	GPS+GLO
14	AIRA	Aira	Japonya	Geospatial Information Authority of Japan	31.8240611	130.5995917	314.64	TRIMBLE NETR9	TRM59800.00	EXTERNAL CESIUM	GPS+GLO+QZSS
15	CHUR	Churchill	Kanada	Natural Resources Kanada	58.758.889	-94.0886	-18.9	TPS NET-G3A	ASH701945E_M	EXTERNAL RUBIDIUM	GPS+GLO
16	DRAG	Metzoki dragot	Israil	Survey of Israel	31.5932000	35.3920694	31.8	JAVAD TRE_3 DELTA	ASH700936D_M	INTERNAL	GPS+GLO+BDS
17	SANT	Santiago	Şili	Jet Propulsion Laboratory	-33.1502878	-70.6685535	723.0746	ASHTECH UZ-12	JAVRINGANT_DM	INTERNAL	GPS
18	YELL	Yellowknife	Kanada	Natural Resources Kanada	62.4809000	-114.4807000	181	JAVAD TRE_3N DELTA	AOAD/M_T	EXTERNAL MASER	GPS+GLO+GAL
19	SPT0	Boras	İsveç	Lantmateriet the Swedish mapping authority	57.7149556	12.8913444	219.9	JAVAD TRE_G3TH DELTA	JNSCR_C146-22-1	EXTERNAL H-MASER	GPS+GLO
20	ONSA	Onsala	İsveç	Lantmateriet the Swedish mapping authority	57.3952972	11.9255139	45.5	JAVAD TRE_G3TH DELTA	AOAD/M_B	EXTERNAL H-MASER	GPS+GLO
21	NAIN	Nain	Kanada	NRCan, Geodetic Survey Division	56.5369639	-61.6887167	33.48	ASHTECH UZ-12	ASH701945D_M	INTERNAL	GPS
22	KIRU	Kiruna	İsveç	ESA/ESOC	67.8573000	20.9684000	391.1	SEPT POLARX4	SEPCHOKE_MC	EXTERNAL CESIUM	GPS+GLO+GAL +BDS+QZSS+SB AS
23	ALGO	Algonquin Park	Kanada	Natural Resources Kanada	45.9588000	-78.0714000	202	JAVAD TRE_G3TH DELTA	AOAD/M_T	INTERNAL	GPS+GLO+GAL
24	BCOV	Beaver Cove	Kanada		50.33	-126.91		Leica GRX1200PRO			

3.2 Metot

3.2.1 Hız kestiriminde kullanılan yöntem

SGPS koordinat zaman serilerinde değişik etkenlerden kaynaklanan kısa ve uzun periyotlu etkenlerin varlığı ve bu periyodik etkenlerin koordinat hızlarını etkilediği bir çok araştırmada konu edilmiştir (Calais, 1999; Blewitt ve Lavallée, 2002; Herring, 2010; Mao ve diğ, 1999; Dong ve diğ, 2002). Bu etkilerin, bazı jeofizik olgular nedeniyle oluşabileceği gibi atmosferik ve hidrolojik yükleme, anten ve anten koruyuculardaki kar ve buz birikmesi vb. bazı iklimsel etkiler GPS referans sistemindeki hatalar, uydu yörünge veya yer dönme parametrelerinden de kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir.

Veri uzunluğuna bağlı olarak çok kısa ve uzun dönemli etkilerin modellenmesi olanaklıdır. Bu etkilerin uygun şekilde modellenmesi, hızların doğru belirlenmesinin yanı sıra bazı jeofizik olayların ortaya çıkarılması açısından da önem taşımaktadır. Spektral analiz ile de SGPS zaman serilerindeki periyodik etkilerin varlığı ortaya konabilir. Bu etkilerin modellenmesi koordinat hızlarının doğru kestirilmesi için önem taşımaktadır.

Genel olarak yapılan araştırmalar sonucunda SGPS zaman serilerinde yıllık periyodik sinyalin belirgin olmasının kabulü ile modellendirme tercih edilmektedir (Wdowinski ve diğ, 1997; Dong ve diğ, 2002). SGPS koordinat zaman serilerinin analizlerinde birçok değişik türde matematiksel modeller kullanılmaktadır.

En genel matematiksel model denklem (3.2)'de gösterilmiştir;

$$y(t) = y_0 + v(t - t_0) + \sum g(t, y) + \varepsilon(t) \qquad (3.2)$$

Burada, $y(t)$ zaman serileri gözlem vektörü, t_0 zaman serileri başlangıç epoğu, y_0 zaman serisinin t_0 anındaki başlangıç koordinat değeri, v istasyon doğrusal hızını $g(t, y)$ istasyon hızlarını etkileyen zamana bağlı diğer jeofiziksel etkenler, $\varepsilon(t)$ ise hata terimidir. Bu eşitlikteki $g(t, y)$ terimi, zaman serisi içerisinde olması muhtemel periyodik ve periyodik olmayan etkilere göre çeşitli biçimlerde ifade edilebilir. Zaman serisi için temel olarak ilk iki terim olan ortalama koordinat ve hız dışında, veri içerisinde değişik nedenlerle (anten değişmesi, yerkabuğu hareketi vb.) oluşan etkiler atım, mevsimsel ve referans sistemi tanımından kaynaklanan periyodik etkiler,

harmonik fonksiyonlarla, deprem sonrası post sismik vb. davranışlar üssel veya logaritmik fonksiyonlar ile modellenebilir. $g(t,x)$ terimi açık olarak,

$$\sum g(t,y) = \sum_{j=1} a_j \sin(2\pi f_j t_i) + b_j \cos(2\pi f_j t_i) + \varepsilon_j(t_i) \qquad (3.3)$$

şeklinde yazılabilir. Buradan denklemimiz;

$$y(t_i) = y_0 + vt_i + \sum_{j=1} a_j \sin(2\pi f_j t_i) + b_j \cos(2\pi f_j t_i) + \varepsilon(t_i) \qquad (3.4)$$

halini almaktadır. Burada f_j terimi sezonsal etkiyi göstermektedir.

Yıllık trend hesaplanırken $f_j = 1cpy$[17], 6 aylık trend hesaplanırken $f_j = 2cpy$ kabul edilmektedir.

Buradan dizayn matrix;

$$a_i = [1 \quad t_i \ \sin(2\pi t_i) \quad \cos(2\pi t_i) \ \sin(4\pi t_i) \quad \cos(4\pi t_i)] \qquad (3.5)$$

Bilinmeyen vektör;

$$x = [y_0 \quad v \ a_1 \quad b_1 \ a_2 \quad b_2] \qquad (3.6)$$

olarak bulunmuştur.

Bu tezde hız kestiriminde "*Çoklu Lineer Regresyon Analizi*" yöntemi kullanılmış olup, bilinmeyenler "*En Küçük Kareler*" yöntemi kullanılarak elde edilmiştir.

Bilindiği üzere, regresyon analizi denklem (3.3)'teki gibi birden fazla bağımsız değişkenin var olduğu araştırma problemlerinde sonuçları tahmin etmek için geliştirilen istatistiksel bir araçtır. Eğer modelin katsayıları lineer ise "*Çoklu Lineer Regresyon Modeli*" adını almaktadır.

Bahse konu modelde;

- Bir k olayında bağımsız değişkenler x_1 , x_2 ,….., x_k olarak kabul edilmekte,
- Çoklu regresyon modeli ile verilen ortalama Y I x_1 , x_2 ,….., x_k

  $\mu_{Y\ I\ x_1,x_2,\ldots..,x_k} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \ldots\ldots + \beta_k x_k$ olur,

Tahmini örnek regresyon denklemi ile,

[17] cpy: Cylce per year to; 1cpy: yılda bir periyod; 2cpy: yılda iki periyod

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + \ldots\ldots + b_k x_k$$ [18] (3.7)

elde edilir.

Bununla birlikte b'lerin varyansları A matrisinin (genel lineer modelin matris çözümünde kullanılan dizayn matrisi) tersinin elemanlarından elde edilir. $A=X^TX$ matrisinin köşegen olmayan elemanları X sütunundaki elemanların toplamını gösterir, köşegen elamanları ise X sütunundaki elemanların karelerinin toplamını göstermektedir. A^{-1} ters matrisi, σ^2 çarpanı haricinde, kestirilen regresyon katsayılarının "*varyans- kovaryans matrisi*" ni ifade etmektedir. $A^{-1}\sigma^2$ matrisinin elamanları $b_0, b_1, \ldots\ldots, b_k$'nın varyanslarını göstermektedir.

Örnek olarak, k=2 olan çoklu lineer regresyon probleminde,

$$\mathbf{(X'X)}^{-1} = \begin{bmatrix} c_{00} & c_{01} & c_{02} \\ c_{10} & c_{11} & c_{12} \\ c_{20} & c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Ana köşegen elemanları simetri biçimde matris olarak yazılabilir. Sonrasında,

$$\sigma^2_{b_i} = c_{ii}\ \sigma^2, \qquad i= 0,1,2, \quad (3.9)$$

$$\sigma^2_{b_i b_j} = \mathrm{Cov}(b_i, b_j) = c_{ij}\ \sigma^2, \quad i \neq j\ . \quad (3.10)$$

olarak ifade edilir.

Normal dağılımlı olarak kabul edilen (j= 0, 1, 2, …..,k) β_j ortalaması ve varyansı $c_{ii}\sigma^2$ olan b_j için istatistik test olarak, Denklem 3.11 kullanılır.

$$t = \frac{b_j - \beta_{j0}}{s\sqrt{c_{jj}}} \quad (3.11)$$

t testi, her bir parametrenin bireysel olarak önemini ortaya koymaktadır. Burada βj GPS sürekli verisinden kestirilen hızı temsil etmektedir. bj ise aylık örneklenmiş veriden denklem (3.3)'ün çoklu regresyonlu ile bulunan hız değeridir. Çalışma

[18] Tahmin edicilerin ortalamaları ve varyansları $b_0, b_1, \ldots\ldots, b_k$ rastgele hatalar üzerinde $\in_1, \in_2, \ldots, \in_k$ basit lineer regresyonda olduğu gibi, belirli varsayımlar altında kolayca elde edilir. Söz konusu hataları bağımsız olarak kabul edersek -herbirinin ortalaması 0 ve varyansı σ^2 olduğu varsayılarak- yansız tahmin edici olan regresyon katsayıları $\beta_0, \beta_1, \ldots\ldots, \beta_k$; sırasıyla $b_0, b_1, \ldots\ldots, b_k$ olarak gösterilebilir.

çerçevesinde bj, doğru kabul edilen βj ile karşılaştırılıp, denklem (3.11) yardımıyla istatistiksel anlamlılığı test edilmiştir.

n-k-1 serbestlik derecesi ile β_j üstüne kurulan güven aralıkları [19] ($-t_{\alpha/2} < t < t_{\alpha/2}$) ile

$$H_0 = \beta_j = \beta_{j0}, \tag{3.12}$$

$$H_1 = \beta_j \neq \beta_{j0}, \tag{3.13}$$

hipotez testleri kurulur.

Regresyon modeli, gözlenen bir veri seti için modelin parametrelerinin hesaplanmasıyla tahmin edilebilmektedir. Bu tezde yatay ve düşey konuma ait hız bilgisinin elde edilmesi maksadıyla denklem 3.4'teki çoklu lineer regresyon modelinde bilinmeyen parametreler EKK yöntemi ile elde edilmiştir.

EKK yönteminde bilinmeyenler, gözlemler ve her bir zaman aralığı için öngörüler arasındaki farkların karelerinin toplamı en aza indirgenerek çözülür. Basitlik için, GPS zaman serisinin gürültü karakteristikleri hesaba katılmaz ve biçimsel hatalar kullanılır. EKK'nın en önemli avantajı uygulama kolaylığı ve doğrusal eğilim ile mevsimsel genlik tahminlerinin basit bir şekilde yorumlanmasıdır. Bununla birlikte, yalnızca sabit genlikler ve/veya fazlar elde edilmektedir. Tekniğin bir dezavantajı, uzun periyodlu varyasyonların yanlışlıkla doğrusal bir eğilim olarak tanımlanabilmesidir. Bununla birlikte, bu husus çalışma için sorun olmayacaktır çünkü çok yıllık bir zaman serisinden altı aylık ve yıllık sinyaller tahmin edilebilmektedir (Chen ve diğ, 2013; Rangelova ve diğ, 2012; Blewitt ve Lavallée, 2002).

Bu çalışmada, günlük yani sürekli veriden kampanya verileri oluşturulması ve bunlardan GPS baz bileşenleri (kuzey, doğu, düşey) doğrultusunda hız kestirimi yapılmasını sağlamak amacıyla elde edilen veriler düzenlenmiştir.

"Lineer Model" esas alınarak türetilen yatay hız bileşenleri ve düşey bileşen hızları için 1 yıllık ve 6 aylık mevsimsel etki dikkate alınmıştır. Her iki konum bilgisi üzerindeki deprem nedeniyle oluşan düşey atımlar giderilmiştir. Söz konusu işlem için "Matlab R2013a" programı kullanılmıştır. Programın kodlaması EK B'de yer

[19] Bağımsız katsayı tahmin edicilerinin dağılımı bilgisi, deneycinin katsayılar için güven aralıkları oluşturmasına ve bunlarla ilgili hipotezleri test etmesine olanak sağlar.

almaktadır. Çizelge 3.2'te programın çıktısı gösterilmekte olup, tahmin edilen parametreler, F testi, parametrelerin t test sonuçları, P değeri gösterilmektedir. Kullanılan regresyon denkleminin kalitesine ışık tutmak amacıyla yapılan bahse konu testlerin amaçlarına değinecek olursak;

"F testi" ile varyans analizi yapılmakta ve modelde önemli miktarda değişkenin yer alıp almadığı belirlenmektedir.

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \ldots\ldots = \beta_k = 0 \qquad (3.14)$$

Bu test iki yönlü bir testtir. H_0'ın reddedilmesi, sabit değerin regresyon denkleminden farklı olduğunu gösterir. Başka bir deyişle, bu da en az bir regresyon değişkeninin önemli olduğunu ifade eder.

"*t testi*" çoklu regresyonda sık sık kullanılmakta olup, modelde yer alan katsayıların önemini ayrı ayrı test etmektedir (H_0:B_j=0 hipotezine karşılık H_1:$B_j \neq 0$). En uygun işe yarar modeli bulmak için değişken eleme olarak t testi kullanılmaktadır. Hipotezin kabul görmesi demek (H_0:B_j= 0 reddedilemez ise), seçilen katsayının önem arz etmediğini gösterir. Katsayı önemsiz çıkarsa değişken, modeldeki diğer regresörlerin varlığında önemsizdir. Dolayısıyla, diğer değişkenlerin etkilerini değiştiremediği için modelden çıkarılabilir.

"*P (Probability)*" yani olasılık değeri; bütün istatistiksel testlerin sonucunda hesaplanır ve yapılan hipotez testlerinde güven aralığına göre olasılık değerimiz belirlenmektedir. Örneğin güven aralığı 0,95 (yüzde 95) seçilen bir hipotezde olasılık değerinin 0,05'ten küçük olması, testin yüzde 95'lik aralığın dışında kaldığını ifade etmekte, başka bir deyişle, H_O hipotezini reddetmek için elimizi güçlendirerek istatistiksel olarak anlamlılığı ifade etmektedir.

"R^2" değeri ise, doğrusal eğilim hakkında bilgi vermektedir. Model, gerçek değerlere ne kadar yakın ise "R^2" değeri "1" değerine yaklaşmaktadır.

Çizelge 3.2'te görüldüğü üzere modeldeki tüm parametreler tahmin edilmiştir. Test sonuçları incelendiğinde standart hatanın on binde iki seviyelerinde olduğu görülmektedir. F testi sonucuna göre önemli miktarda değişkenliğin açıklandığı gösterilmektedir. Ayrıca değerin çok yüksek olması kurulan denklemin yerinde olduğunu göstermektedir. Bireysel olarak değişkenlere bakıldığında t test sonuçlarına

göre değerler ±1,96 değerlerinin çok uzağındadır bu da regresyondaki tüm değişkenlerin önemli olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.2: Matlab Programında ALGO İstasyonu için Günlük ve Aylık Verilerden Elde Edilen LSE Sonucu.

		Günlük	Aylık
Tahmin Edilen Parametreler*	y0	-0,0569	0,0719
	v	0,0059	0,0073
	a1	0,0035	0,0086
	b1	0,0041	-0,0006
	a2	0,0016	-0,0019
	b2	-0,0007	-0,0036
	MSE	0,0002	0,0001
Tahmin Edilen Parametreler'in Standar Hatası	y0	0,0002	0,0008
	v	0,0000	0,0001
	a1	0,0002	0,0011
	b1	0,0002	0,0011
	a2	0,0002	0,0011
	b2	0,0002	0,0011
t test sonuçları	y0	-362.677	923.841
	v	2.016.888	493.295
	a1	158.595	78.119
	b1	185.841	-0,5708
	a2	71.155	-17.661
	b2	-32.047	-32.578
R^2 Değerlendirmesi	R^2 statistics	0,8631	0,9212
	F statistics	83.134.206	4.955.481
	P value	0,0000	0,0000
	Estimate of Error Variance	0,0002	0,0001

* (y0= kesişim, v=eğim, a1= yıllık bileşeneler için bilinmeyen, b1= yıllık bileşenler için bilinmeyen, a2= yarı yıllık bileşenler için bilinmeyen, b2= yarı yıllık bileşenler için bilinmeyen)

3.2.2 İstatistiksel olarak değerlendirilme

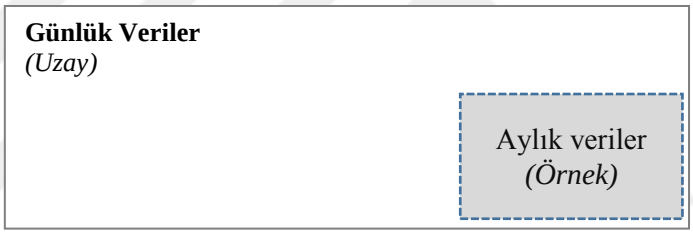
Günlük ve aylık veriler ile ilgili her IGS istasyonu için çoklu lineer regresyon modelleri kurulmuştur. Bu sayede her bir IGS noktası için üç boyutlu günlük ve aylık deformasyon oranları elde edilmiştir. Bu aşamadan sonra aylık veriden elde edilen hızın (b_j) günlük veriden elde edilene (β_j) karşı anlamlılığını test etmek amacıyla istatistiksel testlerin kullanılması gerekmektedir.

Ancak söz konusu testler genel itibarıyla anket veya örneklem uzaylarında uygulandığından dolayı, tektonik hareketler için uygulanmasında farklı yorumlar içerebilmektedir. Bu çalışmada JPL den elde edilen 24 saat oturum süreli günlük zaman serisi verisinden elde edilen hız (β_j) ile günlük zaman serisinden örneklenen kampanya (seyreltilmiş) 24 saat oturum süreli aylık zaman serisinden elde edilen hız (b_j) istatistiksel anlamlılık bakımından test edilmiştir. Başka bir deyişle günlük ve

aylık veriden elde edilen hız ve hatası kitle parametreleri olarak ele alınarak günlük veriden elde edilen trend ile aylık veriden elde edilen trend denklem 3.11'deki test yöntemi ve aşağıda verilen diğer istatistiksel metotlar kullanılarak karşılaştırılmıştır. EKK ile kestirilen günlük ve aylık verinin deformasyon oranları arasındaki farkın anlamlılığı, kitle parametresi olan varyansın bilindiği ve bilinmediği durumlar göz önüne alınarak test edilmiştir. Toplam 3 adet istatistiksel varsayım kabul edilmiş olup detayları aşağıda özetlenmiştir. Aynı zamanda Paternoster ve diğ. (1998)'a göre de yeniden düzenlenen formül ile sonuçlar test edilmiş olup EK E'de anlatılmaktadır.

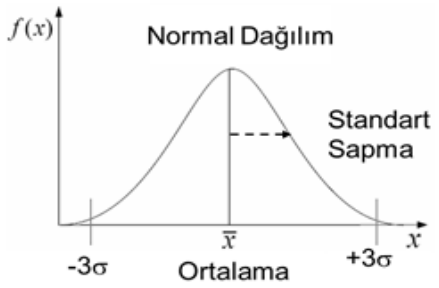
3.2.2.1 I. Varsayım

Söz konusu varsayımda günlük sürekli elde edilen verilerin uzayı (tüm verileri) temsil ettiği, ortalamasının μ olduğu, standart sapmasının ise σ olduğu ve bilindiği varsayılmıştır. Bu durumda aylık toplanan veriler ise bizim örnek alınan topluluğumuz olmaktadır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: I.Varsayım'ın Temsili Gösterimi.

Bu durumda günlük sürekli verilerimiz tüm verileri temsil ettiğinden dolayı, dağılımın z (normal) dağılım olması beklenmektedir. Bilindiği üzere: "*Normal dağılım; sürekli ve olasılıklı bir fonksiyon eğrisi olup, 'Gauss Dağılımı' ya da 'Gauss Eğrisi' olarak ta bilinir. Evren Ortalaması (μ, aritmetik ortalama) ve evren standart sapması (σ, yayılım) normal dağılımı tam anlamıyla tanımlayan iki parametredir*." (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Normal Dağılım Grafiksel Gösterimi.

Normal dağılımın karakteristik özellikleri; simetrik olması, (- ∞, + ∞) aralığında değerler alması, eğri altındaki toplam alanın olasılığının 1 olmasıdır. Normal dağılım

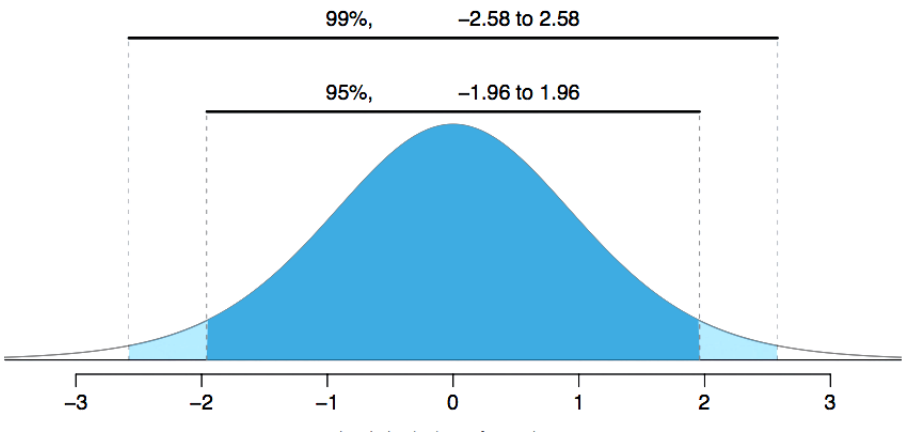
gösteren ölçme sonuçlarının belli aralıklarla görülme olasılığının belirlenebilmesi, normal dağılım eğrisinin iyi tanımlı olabilmesi ile sağlanmaktadır. Böylece normal dağılıma sahip ölçme sonuçlarının görülme olasılığına ilişkin kestirimlerin yapılabilmesi mümkün hale gelmektedir.

Günlük ve aylık verilerin kıyaslanmasında z dağılım formülü kullanılmıştır;

$$z = \frac{x-\mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \tag{3.15}$$

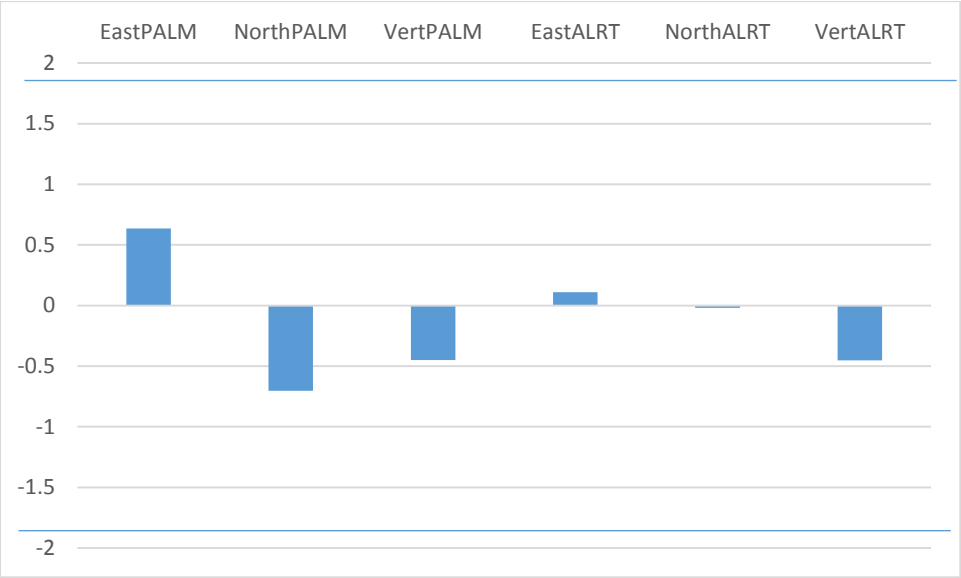
Burada "μ" günlük verinin deformasyon oranını, "x" aylık verinin deformasyon oranını, "σ" günlük verinin standart sapmasını, "n" ise aylık veriden alınan örnek sayısını betimlemektedir.

Belirlenen güven aralıklarına göre deformasyonların kabul edilir aralıkta olup olmadığına karar verilmektedir. İstatistiksel yöntemlerde güven aralıkları yüzde 90, 95, 99 olmak üzere üç şekilde belirlenmektedir. Bu güven aralıklarına göre Z_{90}=1,645, Z_{95} =1,96, Z_{99} =2,58 olarak belirlenmiştir. Kıyaslama sonucunda bulduğumuz değer bu aralık içerisinde çıkarsa sonuç kabul edilir çıkmaktadır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: %95 ve %99 Güven Aralıklarına Göre Z Dağılımı.

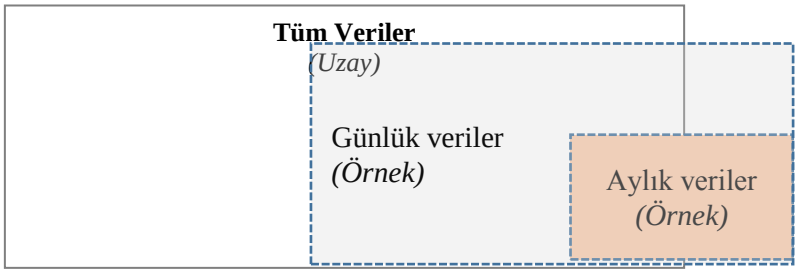
Bu bilgiler ışığında PALM ve ALRT istasyonlarının üç boyutlu deformasyonlarını yüzde 95 güven aralığında incelendiğinde Şekil 3.5'i elde etmiş oluruz. Görüldüğü üzere elde edilen rakamlar güven aralığı sınırlarında kaldığından dolayı Ho hipotezimiz doğru olup, bu noktaların üç boyutlu deformasyonlar arasındaki farkın anlamlı çıktığı söylenemez.



Şekil 3.5: %95 Güven Aralığında Günlük ve Aylık Verilerin Hızlarının Kıyaslanması.

3.2.2.2 II. Varsayım

İlk varsayım literatürde yer bulmuş ve bu konuda çalışmalar ortaya koyulmuştur. Ancak günlük verilerin ve aylık verilerin sayısı ne kadar fazla olursa olsun bunlar çok büyük bir veri içerisinden alınmış örneklerdir. Aynı uzay içerisinden alındıklarından dolayı "σ" eşit olduğu ama bilinmediği kabul edilmiştir. Şekil 3.6'da alınan örnekler ve uzay özetlenmiştir.



Şekil 3.6: II.Varsayım'ın Temsili Gösterimi.

Özetle, örneklem uzayının, sürekli (günlük) veri ve kampanya (aylık) verisinden çok büyük olduğu, günlük ve aylık verinin aynı örneklem uzayında yer aldığı ve standart sapmalarının eşit ama bilinmediği varsayılmıştır. Buna göre formülümüz denklem 3.16'da özetlenmiştir.

$$T = \frac{(\overline{X_1} - \overline{X_2}) - (d_0)}{S_P \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \tag{3.16}$$

$$v = n_1 + n_2 - 2 \tag{3.17}$$

$$S_P{}^2 = \frac{(n_1-1){S_1}^2+(n_2-1){S_2}^2}{n_1+n_2-2} \quad (3.18)$$

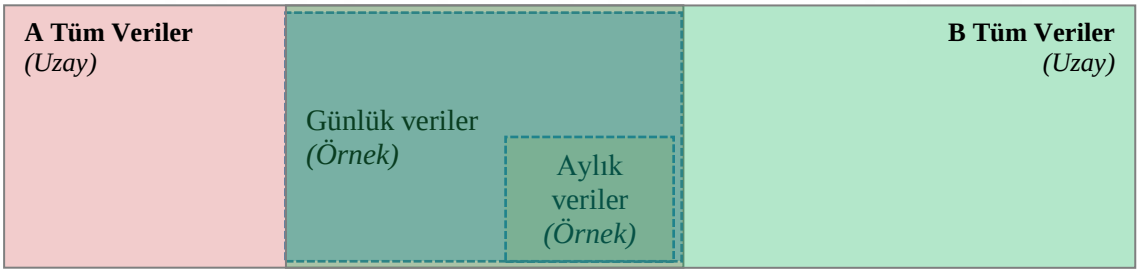
$\sigma_1 = \sigma_2$ ama bilinmiyor

Burada "X_1" günlük verinin deformasyon oranını, "X_2" aylık verinin deformasyon oranını, "S_1" günlük verinin standart sapmasını, "S_2" aylık verinin standart sapmasını, "S_p" eş standart sapmayı, "n" ise veriden alınan örnek sayısını betimlemektedir. μ ve σ uzayın ortalama ve standart sapmasını temsil etmektedir. d_0 ise iki örneklemin ortalamaları arasındaki farkı belirtmektedir.

Bu testte de bir önceki varsayımdaki gibi farklı güven aralıklarına göre test yapılmıştır..

3.2.2.3 III. Varsayım

2. Varsayıma benzer şekilde bu varsayımda da örneklerimizin kendinden daha büyük veri setlerinden alındığı varsayılmıştır. Ancak bu sefer aylık ve günlük verilerin farklı uzaya ait veri setlerinden ve kesişimlerinin olduğu varsayılmıştır. Bu yüzden uzayların standart sapmaları farklı (σ1≠ σ2) ve bilinmediği kabul edilmiştir.



Şekil 3.7: III.Varsayım'ın Temsili Gösterimi.

Şekil 3.7'de belirtildiği üzere günlük veriler A uzayına, aylık verilerin ise B uzayına ait olduğu varsayılmıştır. Buna göre formülümüz;

$$t = \frac{(\overline{X_1}-\overline{X_2})-(d_0)}{\sqrt{\left(\frac{{s_1}^2}{n_1}+\frac{{s_2}^2}{n_2}\right)}} \quad (3.19)$$

$\sigma_1 \neq \sigma_2$ ve bilinmiyor

Burada "X_1" günlük verinin deformasyon oranını, "X_2" aylık verinin deformasyon oranını, "S_1" günlük verinin standart sapmasını, "S_2" aylık verinin standart sapmasını,

“n” ise veriden alınan örnek sayısını betimlemektedir. σ uzayın standart sapmasını temsil etmektedir. d_0 ise iki örneklemin ortalamaları arasındaki farkı belirtmektedir.

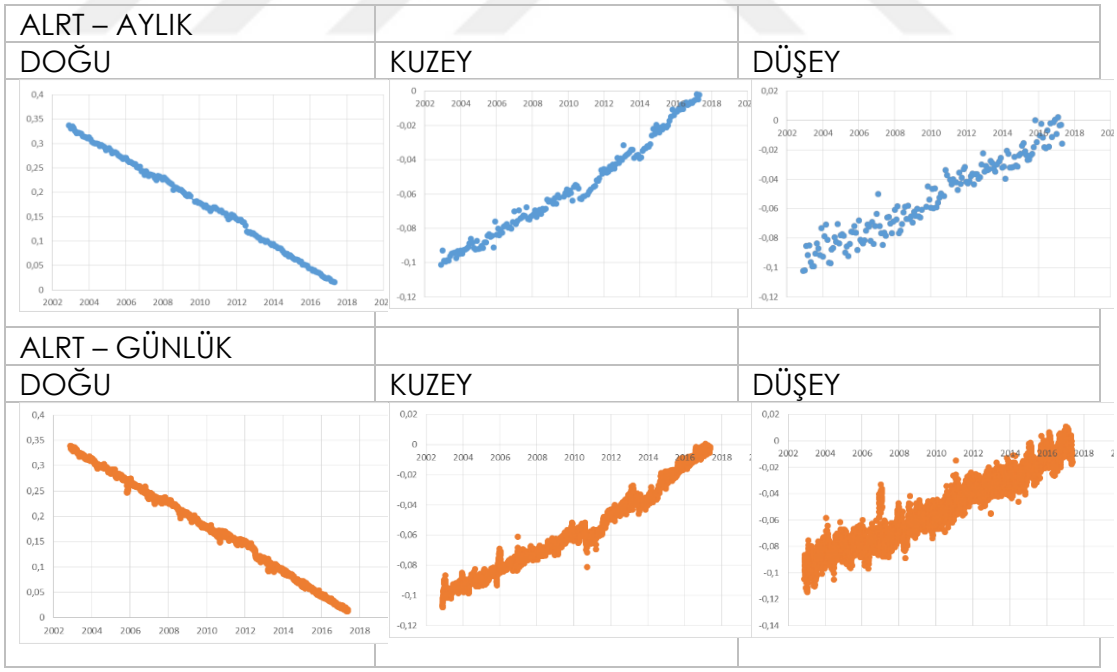
Bu testte de farklı güven aralıklarına göre test yapılmıştır. Söz konusu testlerin tümü bulgular kısmında detaylandırılmıştır.

4. BULGULAR

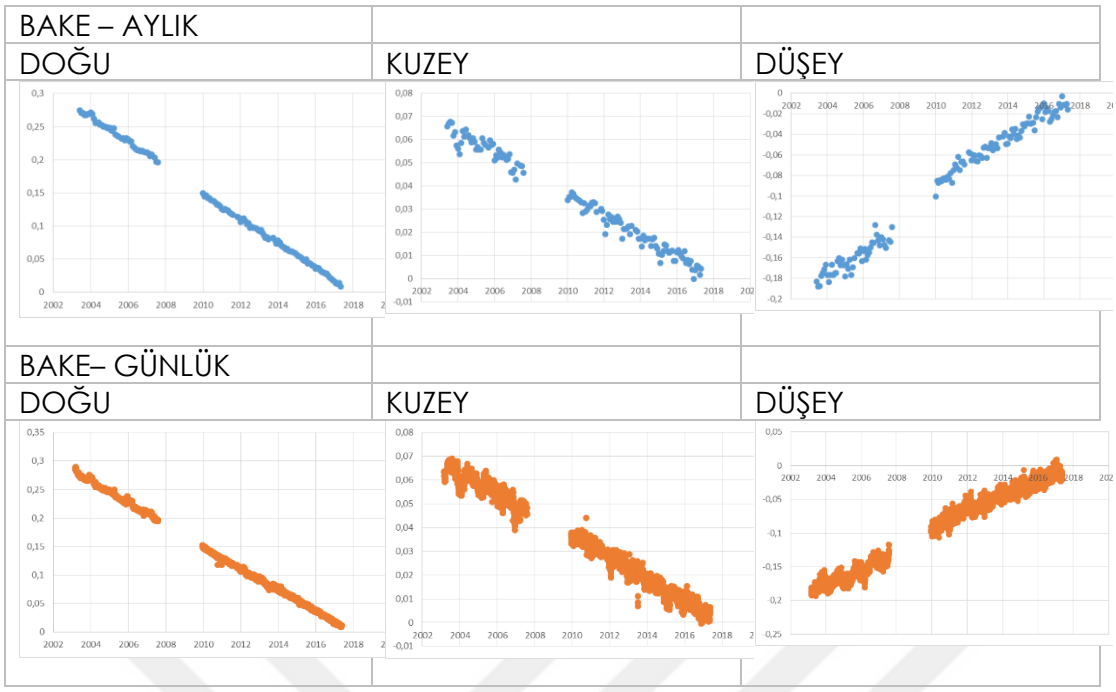
4.1 IGS istasyonları hız kestirim sonuçları

IGS istasyonlarından elde edilen günlük ve günlük veriden seyreltilerek oluşturulan aylık zaman serileri incelenerek trendleri hakkında değerlendirmeler yapılmıştır. 24 adet IGS istasyonuna (PALM, ALRT, BAKE, HOFN, HOLM, IQAL, NYAL, PETS, QIKI, RESO, SCOR, THU2, TRO1, AIRA, CHUR, DRAG, SANT, YELL, SPT0, ONSA, NAIN, KIRU, ALGO, BCOV) ait Matlab programı ile oluşturulan hız vektörlerinin 3 boyutu (doğu, kuzey, düşey) Şekil 4.1-4.7'de gösterilmekte olup, kalan IGS noktaları ile oluşturulan hız vektörleri EK F'de listelenmiştir.

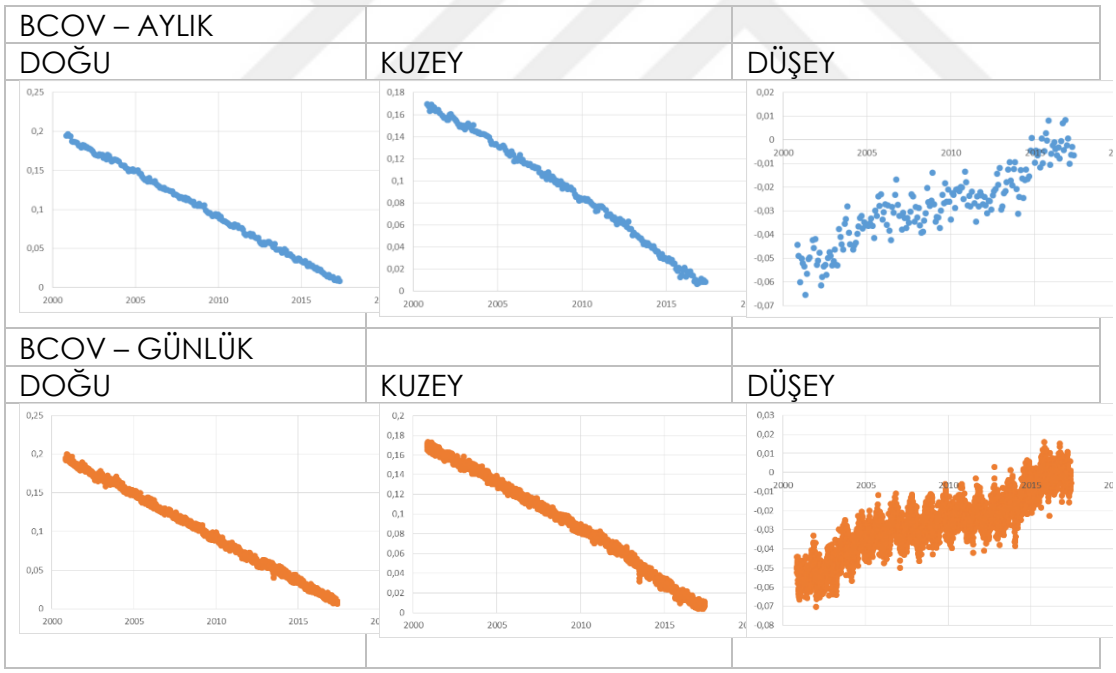
Kampanya tipi gözlemlerin zamansal olarak daha seyrek olması sebebiyle Çizelge 4.1'de görüldüğü üzere düşey aylık verisinin R^2 değeri, günlük verinin R^2 değerinden daha düşüktür.



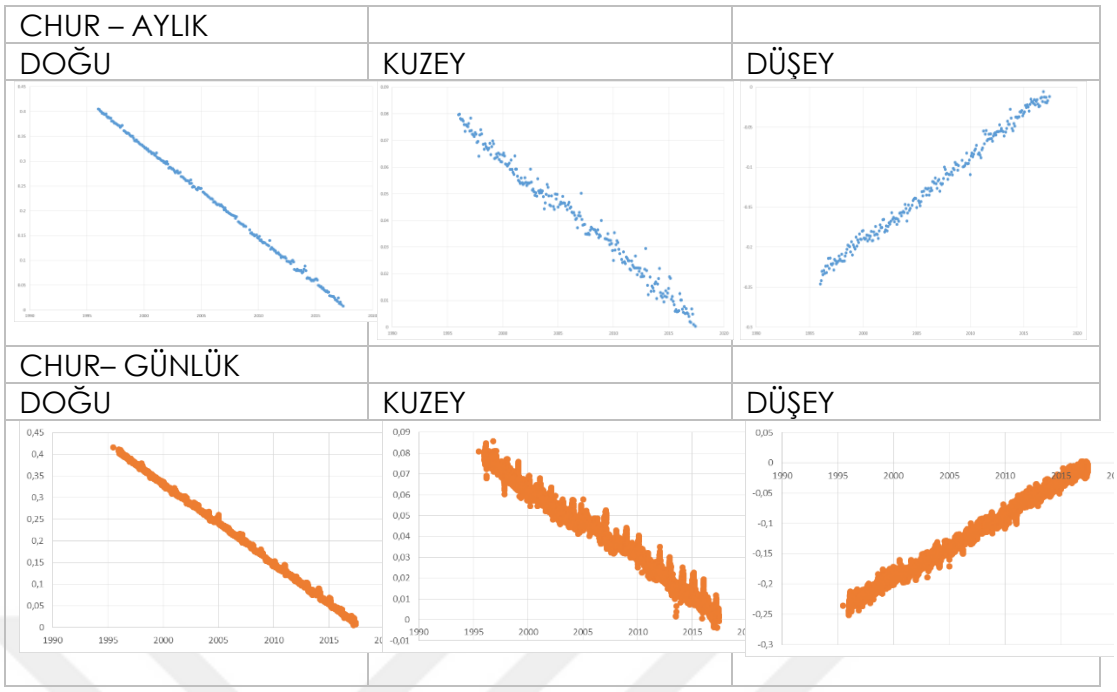
Şekil 4.1: ALRT Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



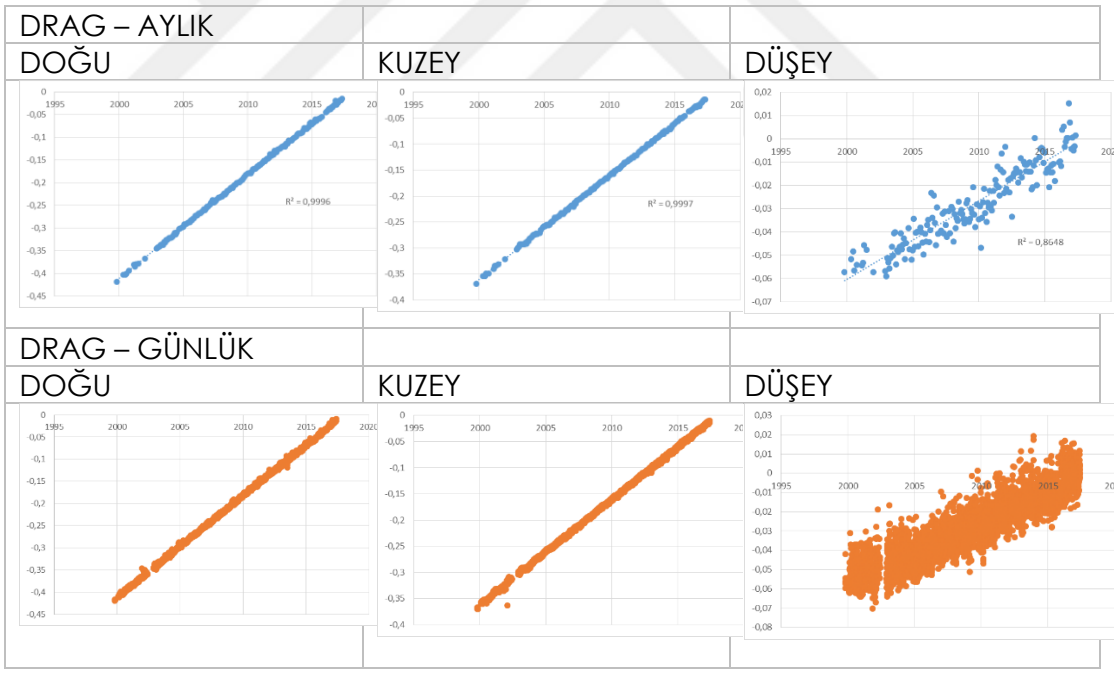
Şekil 4.2: BAKE Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



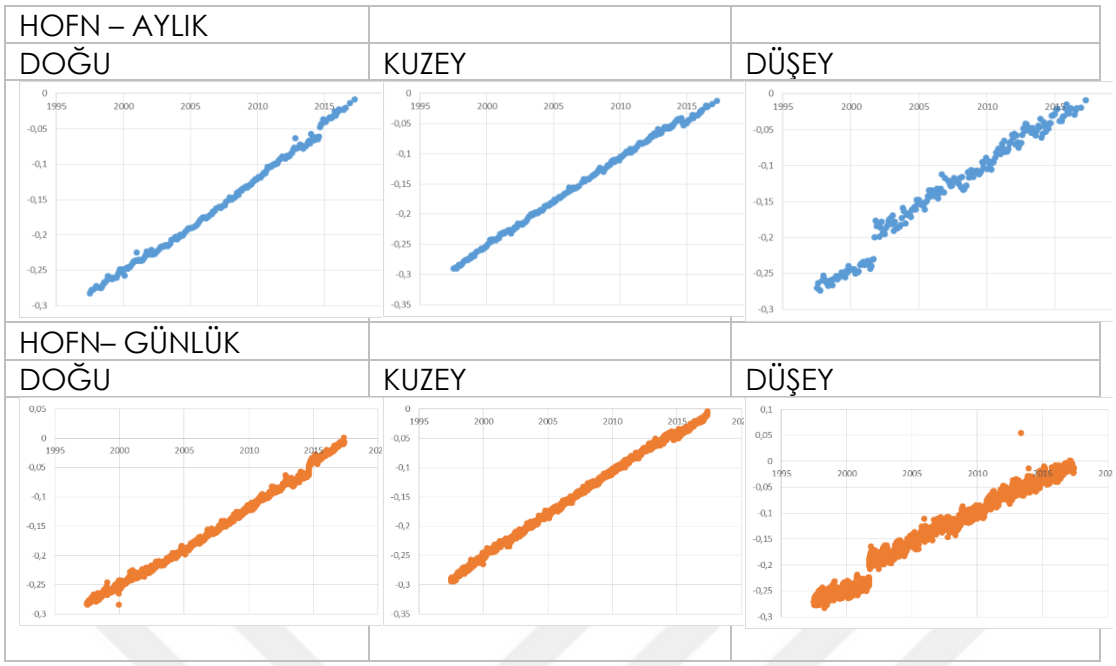
Şekil 4.3: BCOV Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



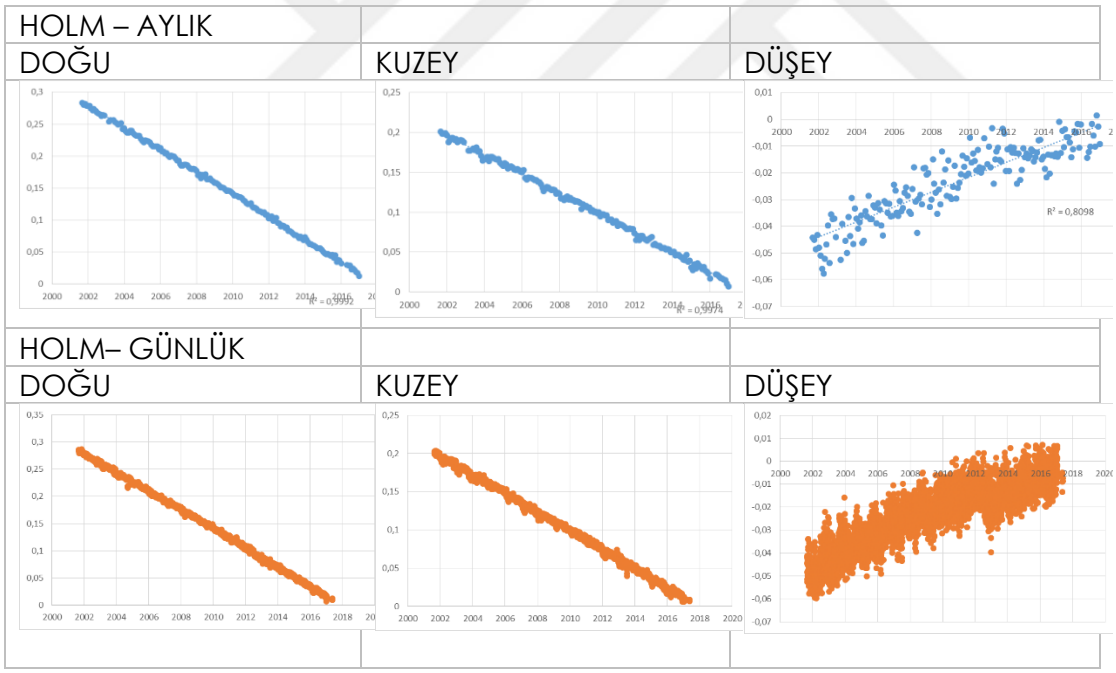
Şekil 4.4: CHUR Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



Şekil 4.5: DRAG noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



Şekil 4.6: HOFN Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



Şekil 4.7: HOLM Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.

Karşılaştırma istatistik ölçümü olarak verinin matematiksel modele yakınlığını belirleyen (R^2) değeri sayesinde, bu çalışma için kurulan regresyon denklemi ile iyi derecede bir kestirim yapıldığı ortaya çıkmıştır. EKK yöntemi, seçilen 24 istasyonun 3 hız vektörü için uygulanmış olup, her hız vektörü için R^2 değerleri bulunmuştur. Her bileşende özellikle de düşey bileşenin yaklaşık olarak 0,85'den büyük olması modelin

gerçeğe yakın olduğunu ifade etmektedir. Söz konusu değerler Çizelge 4.1'te listelenmiştir.

Çizelge 4.1: Matlab Programında Tüm İstasyonlar için Günlük ve Aylık Verilerden Elde Edilen R^2 Değerleri.

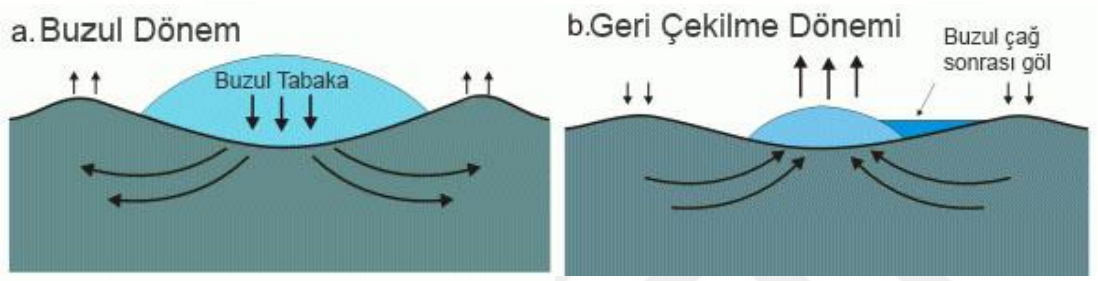
	İstasyon Adı	R^2 (aylık)				R^2 (günlük)			
		Doğu	Kuzey	Düşey	Veri Sayısı	Doğu	Kuzey	Düşey	Veri Sayısı
1	**AIRA**	0,9986	0,9979	0,8387	214	0,9987	0,9977	0,8185	6605
2	**ALGO**	0,9988	0,9644	0,9101	209	0,9992	0,9645	0,9196	6720
3	**ALRT**	0,9979	0,9766	0,9463	168	0,9976	0,9732	0,9376	5107
4	**BAKE**	0,9992	0,9895	0,9841	134	0,9992	0,9891	0,9837	4054
5	**BCOV**	0,9989	0,9954	0,8572	194	0,9985	0,9951	0,8543	5902
6	**CHUR**	0,9994	0,987	0,9924	247	0,9995	0,9845	0,992	7552
7	**DRAG**	0,9996	0,9997	0,869	173	0,9997	0,9997	0,8553	5444
8	**HOFN**	0,9953	0,9979	0,9802	223	0,9955	0,998	0,9805	6719
9	**HOLM**	0,9992	0,9979	0,8232	178	0,9991	0,998	0,7952	5386
10	**IQAL**	0,9987	0,9803	0,7545	78	0,9984	0,9754	0,7672	2360
11	**KIRU**	0,9978	0,9909	0,9212	218	0,999	0,998	0,8631	6598
12	**NAIN**	0,9992	0,998	0,8996	167	0,9992	0,9978	0,9058	5001
13	**NYAL**	0,9991	0,9996	0,9844	246	0,9992	0,9995	0,9827	7651
14	**ONSA**	0,9993	0,9996	0,8745	209	0,9997	0,9996	0,8637	6729
15	**PALM**	0,9987	0,9971	0,941	222	0,9987	0,9971	0,9394	6683
16	**PETS**	0,9797	0,9367	0,9026	148	0,9803	0,9373	0,894	4559
17	**QIKI**	0,9269	0,9949	0,9269	147	0,9981	0,9934	0,9131	4482
18	**RESO**	0,999	0,9799	0,9557	180	0,9989	0,9796	0,9565	5456
19	**SANT**	0,9542	0,9964	0,7742	231	0,954	0,9967	0,7669	6978
20	**SCOR**	0,9975	0,999	0,8435	139	0,9976	0,9991	0,8505	4261
21	**SPT0**	0,9996	0,9994	0,902	184	0,9996	0,9995	0,9123	5611
22	**THU2**	0,9999	0,9968	0,9601	201	0,9999	0,9958	0,9606	6056
23	**TRO1**	0,9977	0,9987	0,9016	221	0,9975	0,9989	0,892	6761
24	**YELL**	0,9984	0,9978	0,9544	220	0,9992	0,9982	0,9703	6789

4.2 Hız kestirimi ve buzul sonrası geri çekilme ilişkisi

Bu bölümde gerçekleştirilen çalışma ile düşey bileşende gözlenen trendin, buzul sonrası geri çekilmeden kaynaklı kabuk yükselişinden meydana gelip gelmediğinin GPS kampanya-ölçüm değerlendirme yöntemlerinden elde edilen hız vektörlerinden yararlanılarak araştırılması hedeflenmiştir. Tezin ana çalışmasından kullanılan IGS istasyonlarına ek olarak, doğrusal eğilim görülen IGS istasyonlarının yanında, bu eğimin görülmediği, diğer bir deyişle düşük R^2 değerli IGS istasyonları da kullanılmıştır. Bu kapsamda, 34 adet IGS istasyonu seçilmiş 1995-2017 yıllarına ait

24 saat oturum süreli GPS düşey bileşenine ait sürekli zaman serisi JPL'den elde edilmiştir (Çizelge 4.2).

Bilindiği üzere, Dünya sürekli hareket halindedir ve üzerinde oluşan fiziksel olaylar yavaşça değişim göstermektedir. En son buzul çağında Dünya'nın bazı kısımlarında oluşan milyon tonluk buzul tabakaları, buzulların altındaki toprakları yarım kilometreye kadar iterken buzul çevresindeki toprakların da birkaç yüz metre yükselmelerine neden olmaktadır. Buz tabakalarının erimesiyle oluşan su, okyanuslara akarak deniz seviyesini yükseltmekte, bunun neticesinde buzul geri çekilme etkisi olarak adlandırılan olay oluşmakta, buzun altındaki topraklar tekrar yükselmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8: Buzul Çekilmesi; a. Buzul dönem b. Geri çekilme dönemi (Courtesy of Tom James at Natural Resources Kanada).

Holosen[20] döneminin başında ve ortasında Kuzey Amerika ve Kuzeybatı Avrupa kıtalarında buz tabakasının kaybolmuş olmasına rağmen, bu bölgelerde belirgin bir yükselme görülmeye devam etmektedir. Bu durumun sebebi, katı yeryuvarının izostatik dengesine erişme oranını sınırlayan nispeten yüksek manto materyali viskozitesidir. Buzul İzostatik Dengeleme (Glacial Isostatic Adjustment-GIA) yeryüzü yerçekim alanının ve okyanusların buzul tabakalarının büyümesine ve erimesine verdiği tepkiyi ifade etmektedir. GIA'nın yaygın olarak incelenen bileşeni, buzul erimesini takiben arazi yüzeyinin tekrar yükselerek eski seviyesine gelmesi ile ilgili olan "buzul sonrası geri çekilme" dir. Nispeten hızlı bir süreç olan GIA, okyanus seviyesinde 100 m'lik değişimleri ve yeryüzünün deformasyonunu tetiklemektedir. Özellikle, Amerika Birleşik Devletleri'nin doğu kıyısı ve Büyük Göller bölgesinde buzul etkisi ile kabaran topraklarda, çökme hareketinin devam ettiği net bir şekilde tespit edilmiştir.

[20] Holosen Dönemi: Günümüzden 11.000 bin yıl önce geç buzul çağının bitmesiyle başlayan dönemdir.

Buzul hareketlerinden kaynaklanan değişiklikler GIA modelleri ile izlenebilmektedir. GPS enstrümanlarından olan jeodezik veri kümesi, InSAR altimetre ve gelgit gösterge verileri, GIA ile ilişkili yüzey deformasyonunu ölçmek için kullanılmaktadır (King ve diğ, 2010). Yerkabuğu, okyanuslar ve buz tabakaları, global ölçekte model hesaplamalarının üç ana bileşeni olarak kabul edilmektedir. GIA modelleri, okyanus ve buz yüküne karşı katı toprak tepkilerinin klasik jeodinamik sorunlarını çözmek için tasarlanmıştır. Modeller ayrıca, okyanusta yerçekimsel olarak erimiş buz sularının kendiliğinden yeniden dağılımını da belirlemektedir.

Buzul geri çekilme etkisinin izlenmesi için kullanılan birçok model literatürde yer almaktadır. Bu modellerin etkin çalışabilmesi için birçok veriye ve tepkinin net bir şekilde ölçülebilmesi içinde buzul etkisinin gözlemlenebileceği yerlere istasyon kurulmasına ihtiyaç vardır. Söz konusu ihtiyaçların giderilmesi ise uzun bir zaman dilimi ve yüksek maliyet gerektirdiğinden, bu modellerin her zaman kullanılması mümkün olamamaktadır. Mevcut durumda GIA etkisini izleyen istasyonlar sadece buzul hareketlerin tespit edildiği noktalarda kurulduğundan, modeller farklı noktalarda buzul etkisinin olup olmadığı konusunda net bir sonuç verememektedir. Ayrıca modellerde bazı hususlar tam olarak ortaya konamamaktadır. Örnek vermek gerekirse, yatay hızlar, düşey hızlardan daha hassastır fakat GIA modelinin hız çıktıları ile karşılaştırıldığında GIA'nın hesaplanabilmesi için plaka hareketinin çıkartılması gerekmektedir. Ayrıca ne plaka hareketi ne de GIA tam olarak hesaplanamadığından kavranması güç bir durum olarak da karşımıza çıkmaktadır.

Çizelge 4.2: Buzul Etki için Seçilen IGS İstasyonları.

İstasyon	Şehir	Ülke	Doğu	Kuzey	Düşey (m)	R^2-Günlük-Düşey
AREQ	Arequipa	Peru	-16.4652778	-71.4927778	2488.9226	0.45
BARH	Bar Harbor	ABD	44.395	-68.2216667	6.8	0.03
BLYT	Blythe	ABD	33.6102778	-114.7147222	85.9	0.11
CEDU	Ceduna	Avustralya	-31.8666667	133.8097222	144.8155	0.28
CHUM	Chumysh	Kazakistan	42.9983333	74.7508333	716.3321	0.38
EBRE	Roquetes	İspanya	40.8208333	0.4922222	107.9	0.12
KOUG	Kourou	Fransa Guyana	5.0983333	-52.6397222	107.248	0.46
MAL2	Malindi	Kenya	-2.9958333	40.1938889	-20.4	0.4
MATE	Matera	İtalya	40.6488889	16.7044444	535.6	0.53
NKLG	Libreville	Gabon	0.3538889	9.6719444	31.496	0.08
ORID	Ohrid	Makedonya	41.1272222	20.7938889	773	0.1
RABT	Rabat	Fas	33.9980556	-6.8541667	90.1	0.49
RAMO	Mitzpe Ramon	Israil	30.5977778	34.7630556	893.1	0.5
SALU	São Luis	Brezilya	-2.5933333	-44.2122222	18.9	0.55
SYOG	Doğu Ongle Island	Antartika	-69.0069444	39.5836111	50.0902	0.28
URUM	Urumqi	Çin	43.59	87.63	856.1	0.63
AIRA	Aira	Japonya	31.8238889	130.5994444	314.64	0.81
ALRT	Alert (Ellesmere Island)	Kanada	82.4941667	-62.3402778	78.11	0.94
BAKE	Baker Lake	Kanada	64.3177778	-96.0022222	4.4	0.98
CHUR	Churchill	Kanada	58.7588889	-94.0886111	-18.9	0.99
HOFN	Hoefn	İzlanda	64.2672222	-15.1866667	82.5	0.98
HOLM	Ulukhaktok, formerly Holman (Victoria Island)	Kanada	70.7363889	-117.7608333	39.5	0.8
IQAL	Iqaluit	Kanada	63.7558333	-68.5102778	91.7	0.77
NYAL	Ny-Alesund	Norveç	78.93	11.87	82	0.98
PALM	Palmer Station	Antarktika	-64.775	-64.0511111	31.2394	0.94
PETS	Petropavlovsk-Kamchatka	Rusya	53.0230556	158.65	102.2	0.89
QIKI	Qikiqtarjuaq (Baffin Island)	Kanada	67.5591667	-64.0336111	13.3	0.91
RESO	Resolute (Cornwallis Island)	Kanada	74.6905556	-94.8930556	34.9	0.96
SCOR	Scoresbysund/Ittoqqoormiit	Grönland	70.4852778	-21.9502778	128.5	0.85
THU2	Thule Airbase	Grönland	76.5369444	-68.825	36.1	0.96
TRO1	Tromsoe	Norveç	69.6625	18.9394444	138	0.89
NAIN	Nain	Kanada	56.5369444	-61.6886111	33.48	0.91
ONSA	Onsala	İsveç	57.3952778	11.9252778	45.5	0.86
TIXI	Tixi	Rusya	71.6344444	128.8663889	46.9847	0.32

Bu çalışmada, Jet Propulsion Laboratory (JPL) tarafından değerlendirilerek GIPSY yazılımı ile analizi yapılan ve yayımlanan zaman serileri Hassas Nokta Konumlandırma (PPP) yöntemiyle elde edilmiştir. Düşey hız öngörümünde: Yıllık doğrusal eğilim ve mevsimsel periyodik etkiler de hesaba katılarak "Çoklu Lineer Regresyon Analizi" ve "EKK" yöntemi kullanılmış, değerlendirme ise Matlab R2013a programı ile gerçekleştirilmiştir. IGS istasyonlarına ait R^2 değerlerinin zaman içinde sabit bir eğilim göstermesi, başka bir deyişle "doğrusal eğim bileşeni", buzul sonrası geri çekilmeden kaynaklı kabuk yükselişi arasındaki korelasyonun ortaya konması açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle EKK yöntemi ile R^2 değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3: En Küçük Kareler Yönteminden Elde Edilen R^2 Değerleri.

İstasyon	Şehir	Enl.	Boy.	R^2	İstasyon	Şehir	Enl.	Boy.	R^2
AIRA	Aira	31.82	130.60	0.81	**NKLG**	Libreville	0.35	9.67	0.08
ALRT	Alert	82.49	-62.34	0.94	**NYAL**	Ny-Alesund	78.93	11.87	0.98
AREQ	Arequipa	-16.47	-71.49	0.45	**ONSA**	Onsala	57.40	11.93	0.86
BAKE	Baker Lake	64.32	-96.00	0.98	**ORID**	Ohrid	41.13	20.79	0.1
BARH	Bar Harbor	44.40	-68.22	0.03	**PALM**	Palmer Station	-64.78	-64.05	0.94
BLYT	Blythe	33.61	-114.71	0.11	**PETS**	Petropavlovsk-Kamchatka	53.02	158.65	0.89
CEDU	Ceduna	-31.87	133.81	0.28	**QIKI**	Qikiqtarjuaq	67.56	-64.03	0.91
CHUM	Chumysh	43.00	74.75	0.38	**RABT**	Rabat	34.00	-6.85	0.49
CHUR	Churchill	58.76	-94.09	0.99	**RAMO**	Mitzpe Ramon	30.60	34.76	0.5
EBRE	Roquetes	40.82	0.49	0.12	**RESO**	Resolute	74.69	-94.89	0.96
HOFN	Hoefn	64.27	-15.19	0.98	**SALU**	São Luis	-2.59	-44.21	0.55
HOLM	Ulukhaktok	70.74	-117.76	0.8	**SCOR**	Scoresbysund	70.49	-21.95	0.85
IQAL	Iqaluit	63.76	-68.51	0.77	**SYOG**	East Ongle Island	-69.01	39.58	0.28
KOUG	Kourou	5.10	-52.64	0.46	**THU2**	Thule Airbase	76.54	-68.83	0.96
MAL2	Malindi	-3.00	40.19	0.4	**TIXI**	Tixi	71.63	128.87	0.32
MATE	Matera	40.65	16.70	0.53	**TRO1**	Tromsoe	69.66	18.94	0.89
NAIN	Nain	56.54	-61.69	0.91	**URUM**	Urumqi	43.59	87.63	0.63

Mekansal ara değer kestirimi olan "kriging" ölçülen noktaların değerlerinin kullanılarak ölçülmemiş noktaların tahmin edilmesidir (Yaprak ve Arslan., 2008). Bahse konu kestirim, tabiat olaylarını temsil eden (tektonik olaylar, yükseklik, sıcaklık ve benzeri) noktaların veya örneklenen noktaların üzerinden ya da yakınından geçen bir fonksiyon kullanarak sürekli yüzeye dönüştürür (Aktaş ve Yılmaz, 2013). Başka bir deyişle, sıradan krigging yöntemi, doğrusal bir kombinasyonla komşu bölgelerdeki ölçülen noktalardan değer tanımlamak için ölçülmeyen noktalar için enterpolasyon teknikleri kullanır. Çalışmada tektonik hareketleri temsil eden noktaların üzerinden

veya yakınından geçen bir fonksiyon kullanılarak sürekli yüzey yer değiştirmesini tahmin etmek için kullanılmıştır. Krigging yönteminin denklemi aşağıdaki şekildedir:

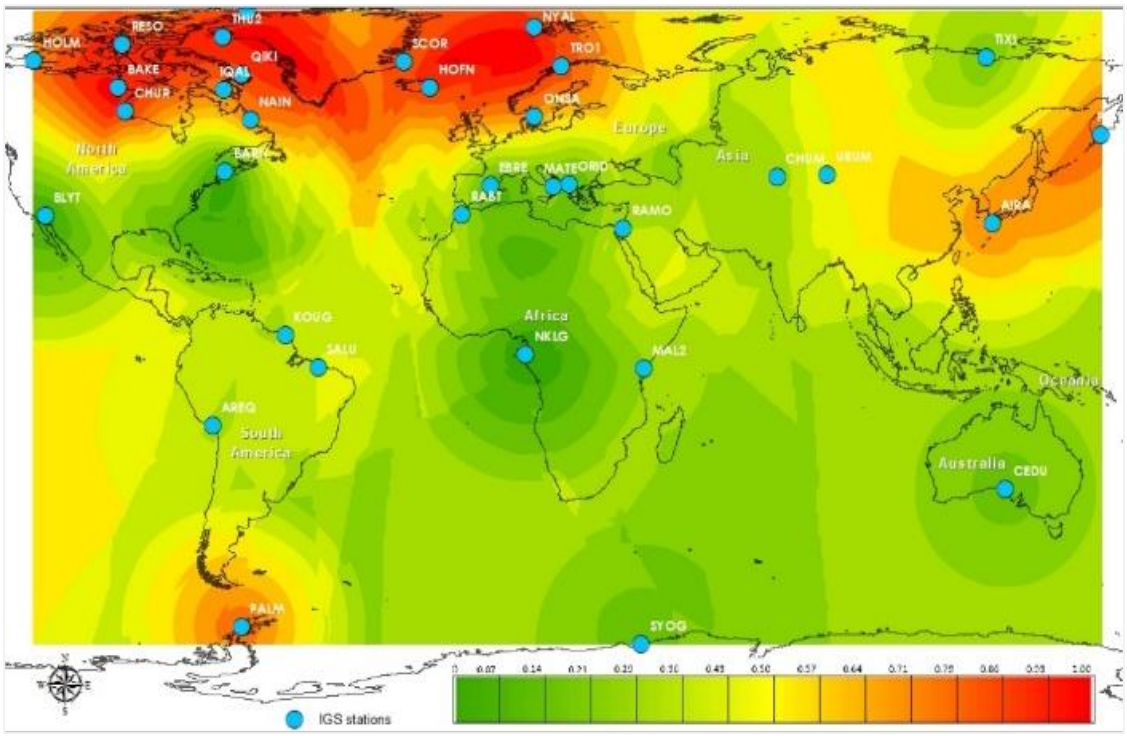
$$Z\ (X_0) = \sum_{i=0}^{N} W_i\ x\ Z(x_i) \qquad (4.1)$$

$Z\ (X_0)$: X_0 noktasındaki tahmini Z değeri,

W_i : $Z\ (X_0)$' fonksiyonunun her bir Z(x_i) için hesaplanan ağırlık değeri,

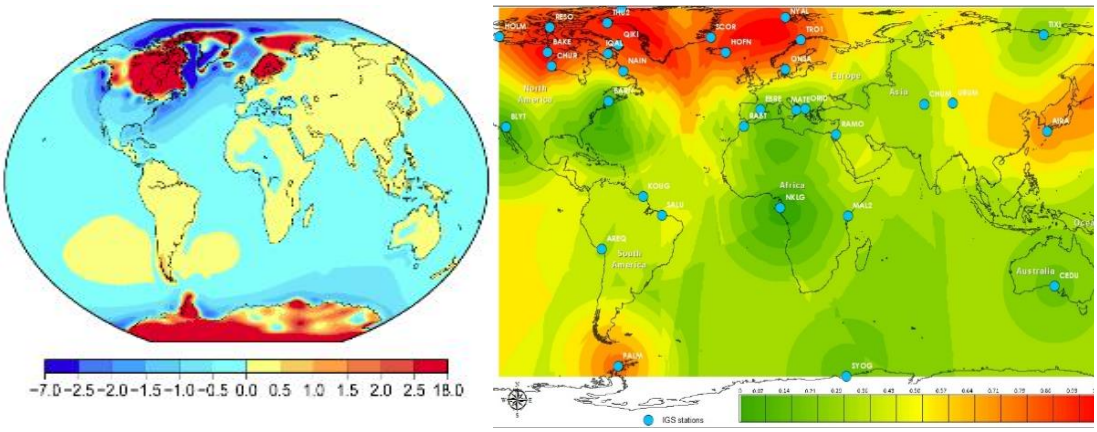
$Z(x_i)$: $Z\ (X_0)$'ı tahmin için kullanılan ampirik ifade

N : Hesaplamada kullanılan nokta sayısı



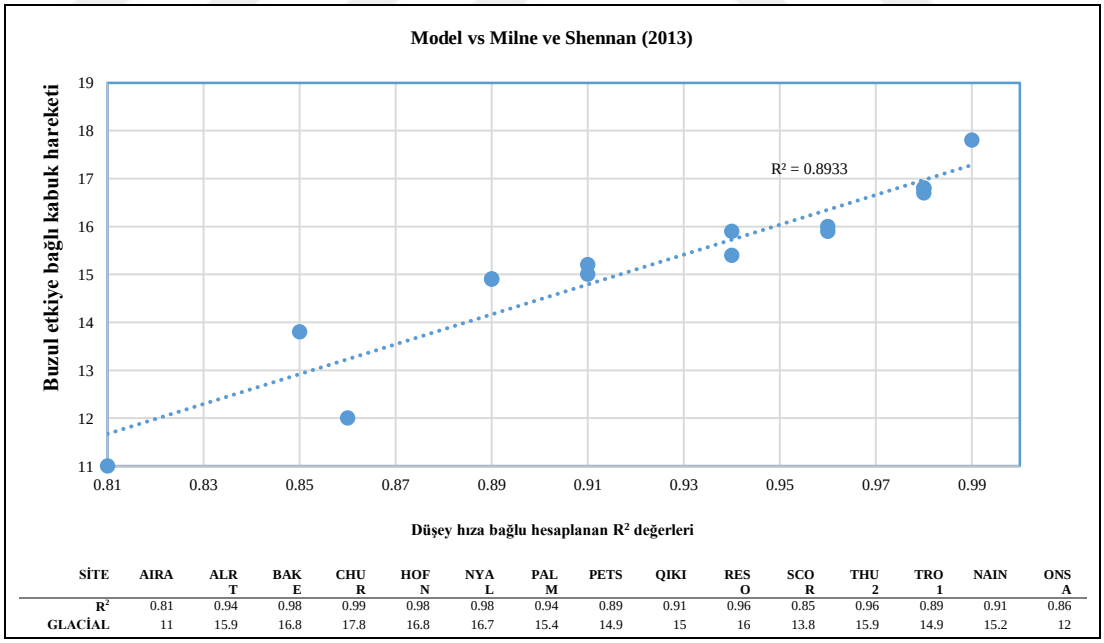
Şekil 4.9: Buzul Etki için Seçilen IGS Noktaları ve Sıradan Krigging Yöntemi ile Oluşturulan Harita.

ArcGIS programı altında yer almakta olan ve jeoistatistik teknik olan "sıradan kriging" ile mekânsal ara kestirim yapılarak R^2 değerlerinin yeryuvarı üzerindeki konumsal gösterimi elde edilmiştir (Şekil 4.9). Harita incelendiğinde özellikle Güney Amerika, Kuzey Avrupa ve Antartika kıtaları'nda R^2 değerinin yüksek olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen harita, Milne ve Shennan (2013) tarafından oluşturulan GIA modeli sonucunda elde edilen harita ile kıyaslanmıştır (Şekil 4.10). Bahse konu harita, buzul izostatik dengeleme modeline dayanarak katı yeryuvarının günümüzdeki öngörülen düşey hareketini (mm/yıl) göstermektedir. Kıyaslamaya göre ilk buzul geri çekilme ve R^2 değerleri arasında korelasyon olduğu görülmektedir.



Şekil 4.10: Buzul Sonrası Geri çekilme Haritası ile Krigging Yöntemi ile Elde Edilen Haritanın Kıyaslanması (Milne ve Shennan, 2013).

Bu korelasyonun ortaya konması adına her iki haritadan örnek noktalar seçilerek korelasyon matrisi oluşturulmuştur. Ortaya konulan modelde R^2 değerlerinin yüzde 80 ve üzerinde olduğu bölgelerde, başka bir deyişle hızın sürekli olarak arttığı istasyonlarda, buzul geri çekilme ile R^2 değerlerinin %89 oranında uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 4.11). Bu da sadece düşey hız izlenmesi ile dünya üzerindeki herhangi bir bölgede buzul etkileri tespit etmemize ve araştırmamıza imkan verecektir.



SİTE	AIRA	ALRT	BAKE	CHUR	HOFN	NYAL	PALM	PETS	QIKI	RESO	SCOR	THU2	TRO1	NAIN	ONSA
R^2	0.81	0.94	0.98	0.99	0.98	0.98	0.94	0.89	0.91	0.96	0.85	0.96	0.89	0.91	0.86
GLACİAL	11	15.9	16.8	17.8	16.8	16.7	15.4	14.9	15	16	13.8	15.9	14.9	15.2	12

Şekil 4.11: Model ve Milne Örneklem Noktalarının Kıyaslanması.

Buzul hareketleri modellemeleri çalışmaları yaygın olarak yapılmasına rağmen buzul çekilmesinin etkisi hala kolay bir şekilde hesaplanamamaktadır. Modelleme

çalışmalarında temel kural en az veri ile en doğru sonuca yaklaştıracak modeli kurmak olduğundan, çalışmamızla elde ettiğimiz basit model ile araştırmacılar buzul sonrası geri tepme etkisini kısa sürede ve düşük maliyetle takip etmeleri mümkün olabilecektir. Bu basit model buzul geri çekilme hakkında fikir verse de, düşey kabuk hareketi, manto taşınımı ve plaka tektoniği çalışmaları için önemli olan global deniz seviyeleri gibi buzul sonrası toparlanma etkileri vb. konuların incelenmesi için daha kapsamlı çalışmalar yapılması gerekmektedir.

4.3 İstatistiki değerlerin sonuçları

İstatistikte varsayımların test edilmesinde hipotez testleri kullanılmaktadır. Hipotez testinin tanımı şu şekilde belirlenmiştir: "*Bilgi üretiminde, basitçe iddia yani sav olarak kabul edilen hipotez ile doğrulanmaya ya da yanlışlama sonucunda karar verme işlemine hipotez testi denir"*.

Hipotez testleri; tarama modeli, deneysel modeller ve genelleme araştırmalarının önemli bir bölümü oluşturur. Hipotez testi aşamaları; varsayımların sağlanması, hipotezlerin kurulması, test istatistiğinin kestirilmesi, karar kurallarının belirlenmesi ve karar-yorumdur. Hipotez testleri, temel varsayımlarda bulunur. Söz konusu varsayımların sağlanması ve sağlanamaması durumlarına göre test sürecinde kullanılacak, test istatistikleri farklılaşmaktadır.

Hipotezler, hipotez testlerinde 'sıfır hipotezi'(*null hypothesis*) ve 'alternatif hipotez' olarak adlandırılan iki önermeyle ifade edilmektedir.

Sıfır hipotezi 'H_0' ile gösterilmekte ve anlamlı bir fark olmadığı iddiasıdır. Alternatif hipotez se 'H_1' ile gösterilir ve anlamlı bir fark olduğu iddiasındadır. 'H_1' önermesinde hipotezin yönü; tek yönlü hipotez ve çift yönlü hipotez olarak iki şekilde kurulabilmektedir. (Denklem 4.2, Denklem 4.3)

Bu çalışmadaki varsayımların hepsinde benzer bir hipotez testi uygulanmıştır.

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \tag{4.2}$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \tag{4.3}$$

Hipotezin reddedildiği durum eşitsizliği temsil ettiğinden dolayı, hem büyüktür hem de küçüktür kümesini kapsamaktadır. Bu sebeple 2 uçlu test (two-tailed test) sonuçlarına göre kontrol yapılmıştır.

Güven aralıkları ise hipotez testi için kararlaştırılan manidarlık düzeyini (α) tanımlar. Genellikle, α = 0,10, α = 0,05 ya da α = 0,01 olarak alınmakta sırasıyla yüzde olarak %90, % 95 ve % 99 olarak ifade edilmektedir.

Z ve *t* testleri için ayrı tablolar ve değerler gösterilmektedir, ancak t örnekleminde örneklem sayısının 120'yi aşması durumunda kritik değerler z ile aynı çıkmaktadır. Bunlar yüzde 90 için 1,645, yüzde 95 için 1,96, yüzde 99 için 2,58'dir. Varsayımlarda kullanılan formüller aşağıdaki Çizelge 4.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 4.4: Çalışmada Kullanılan Varsayımların Test Formülleri.

Varsayım	Formül	Varyans
I	$Z = \frac{x - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}}$	σ biliniyor
II	$T = \frac{(\overline{X_1} - \overline{X_2}) - (d_0)}{S_P\sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$	$\sigma_1 = \sigma_2$ bilinmiyor
III	$T = \frac{(\overline{X_1} - \overline{X_2}) - (d_0)}{\sqrt{\left(\frac{{s_1}^2}{n_1} + \frac{{s_2}^2}{n_2}\right)}}$	$\sigma_1 \neq \sigma_2$ bilinmiyor

Söz konusu formüller güven aralıklarına göre hesaplandıktan sonra karar verilmesi gerekmektedir. "*Varsayılan test istatistiğinin değerlendirilmesinde kullanılacak ve karar verilmesini sağlayacak kritik noktaların güven aralığına ve hipotezin yönüne göre belirlenmesi karar kuralı olarak tanımlanmaktadır*". Bunun için, seçilen manidarlık düzeyi ve hipotez yönüne göre 'kabul' ve 'ret' bölgeleri belirlenir, güven aralığını tanımlayan kritik değerler kullanılan teste göre belirlenir ve güven aralığına göre karar kuralı yazılır. Bu kararın ortaya koyulabilmesi için deformasyon kıyaslamaları 3 güven aralığına göre belirlenmiş ve tablolar elde edilmiştir.

Test sonuçları yüzde 90, 95 ve 99 (Z_{90}=1,645, Z_{95} =1,96, Z_{99} =2,58) güven aralıklarına göre hesaplanmış, güven aralığı sonuçları aşağıda listelenmiştir. İşaretli sayılar "reddedilebilir" başka bir deyişle aylık verinin günlük veri olarak kullanılamayacağını ifade etmektedir.

Çizelge 4.5: Güven Aralıklarına Göre Test Sonuçları.

Sıra	İstasyon	Yön	Varsayım:1	Varsayım:2	Varsayım:3
1	AIRA	Doğu	-0,4673	-0,4590	-0,4328
		Kuzey	0,2332	0,2296	0,2345
		Düşey	**-2,0741**	**-2,0435**	**-2,1135**
2	ALGO	Doğu	-0,5741	-0,5682	-0,6866
		Kuzey	1,2194	1,2059	1,4097
		Düşey	1,1857	1,1719	1,3376
3	ALRT	Doğu	0,1093	0,1077	0,1122
		Kuzey	-0,0190	-0,0190	-0,0941
		Düşey	-0,4528	-0,4464	-0,4771
4	BAKE	Doğu	-0,6219	-0,6109	-0,5849
		Kuzey	0,2459	0,2419	0,2412
		Düşey	1,2298	1,2091	1,1837
5	BCOV	Doğu	-1,1749	-1,1599	-1,2981
		Kuzey	-0,2723	-0,2680	-0,2721
		Düşey	-1,2709	-1,2519	-1,2966
6	CHUR	Doğu	-0,1430	-0,1406	-0,1367
		Kuzey	-0,4307	-0,4248	-0,4555
		Düşey	0,0515	0,0507	0,0511
7	DRAG	Doğu	-0,3191	-0,3138	-0,3023
		Kuzey	**-1,8513**	**-1,8271**	**-1,9831**
		Düşey	0,0841	0,0828	0,0836
8	HOFN	Doğu	0,2490	0,2447	0,2376
		Kuzey	-0,2203	-0,2165	-0,2100
		Düşey	-0,0731	-0,0719	-0,0704
9	HOLM	Doğu	-0,1884	-0,1855	-0,1921
		Kuzey	0,0734	0,0721	0,0695
		Düşey	1,0825	1,0662	1,1002
10	IQAL	Doğu	0,0695	0,0685	0,0725
		Kuzey	-0,1684	-0,1660	-0,1781
		Düşey	-0,7709	-0,7579	-0,7412
11	KIRU	Doğu	1,1827	1,1648	1,1773
		Kuzey	0,0082	0,0081	0,0086
		Düşey	-0,3175	-0,3147	-0,4077
12	NAIN	Doğu	0,6650	0,6549	0,6752
		Kuzey	0,4360	0,4295	0,4477
		Düşey	-0,2334	-0,2292	-0,2188
13	NYAL	Doğu*	**1,9428**	**1,9052**	**1,7223**
		Kuzey	-0,3022	-0,2980	-0,3144
		Düşey	0,2416	0,2381	0,2474
14	ONSA	Doğu	0,7136	0,7028	0,7162
		Kuzey	-0,0954	-0,0943	-0,1080
		Düşey	-0,6282	-0,6214	-0,7445

*: yüzde 90 güven aralığını göre reddedilebilir.

Çizelge 4.5 (devam) : Güven Aralıklarına Göre Test Sonuçları.

Sıra	İstasyon	Yön	Varsayım:1	Varsayım:2	Varsayım:3
15	PALM	Doğu	0,6364	0,6251	0,5981
		Kuzey	-0,7020	-0,6905	-0,6872
		Düşey	-0,4485	-0,4413	-0,4447
16	PETS	Doğu	-0,0596	-0,0586	-0,0566
		Kuzey	-0,6059	-0,5955	-0,5740
		Düşey	-0,8583	-0,8447	-0,8465
17	QIKI	Doğu	0,1376	0,1376	0,7516
		Kuzey	0,0142	0,0142	0,0770
		Düşey	0,0356	0,0356	0,1934
18	RESO	Doğu	-0,1549	-0,1527	-0,1629
		Kuzey	-0,2304	-0,2266	-0,2237
		Düşey	0,1613	0,1585	0,1547
19	SANT	Doğu	0,7918	0,7786	0,7658
		Kuzey	-0,9217	-0,9054	-0,8670
		Düşey	-0,0754	-0,0742	-0,0749
20	SCOR	Doğu	-0,6551	-0,6435	-0,6129
		Kuzey	1,0604	1,0408	0,9688
		Düşey	1,1722	1,1502	1,0618
21	SPT0	Doğu	-1,6041	-1,5780	-1,5658
		Kuzey	0,9352	0,9178	0,8525
		Düşey	0,0954	0,0937	0,0868
22	THU2	Doğu	-0,0511	-0,0503	-0,0530
		Kuzey	0,5253	0,5185	0,5761
		Düşey	-0,4154	-0,4084	-0,4016
23	TRO1	Doğu	0,0546	0,0538	0,0552
		Kuzey	0,1443	0,1416	0,1307
		Düşey	0,1663	0,1638	0,1693
24	YELL	Doğu	-0,0650	-0,0641	-0,0657
		Kuzey	0,4801	0,4727	0,4801
		Düşey	0,3280	0,3235	0,3477

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada "24 saatlik kampanya ölçümleri ve ayda bir veri örneklemesi ile sürekli GPS'ten elde edilen hız doğruluğuna ulaşma" motivasyonu benimsenerek yola çıkılmış; bu doğrultuda 1995-2017 yılları arasında 22 yıllık bir zaman dilimini kapsayacak şekilde- 24 adet IGS noktası (PALM, ALRT, BAKE, HOFN, HOLM, IQAL, NYAL, PETS, QIKI, RESO, SCOR, THU2, TRO1, AIRA, CHUR, DRAG, SANT, YELL, SPT0, ONSA, NAIN, KIRU, ALGO, BCOV) seçilerek ayda bir kampanya ölçümleri oluşturacak şekilde seyreltilmiş, aylık verilerden elde edilen deformasyon oranları aynı istasyonalara ait sürekli zaman serilerinden elde edilen deformasyon oranları ile karşılaştırılmış ve üç boyutlu hızlar arasındaki farkın istatistiksel anlamlı olmadığı belirlenmiştir.

Bu kapsamda, seçilen IGS istasyonlarına ait JPL tarafından GIPSY yazılımı ile analize tabi tutularak türetilen 24 saat oturum süreli GPS baz bileşenlerinin (kuzey, doğu, düşey) günlük ya da başka bir deyişle sürekli zaman verisi elde edilmiştir.

İstasyon seçiminde Akarsu'nun (2012) çalışmasında ortaya konan tespitler etkili olmuştur. Söz konusu çalışmanın bulgusu olan 8-12 saatlik oturum süreli GPS ölçümlerinin 24 saatlik oturum süreli GPS ölçümleri ile karşılaştırması sonucunda yükseklik bileşeninin düşük kalite olması, bu tezde yükseklik bileşeninin matematiksel modele yatkınlığını belirleyen R^2 değeri yüksek olan noktaların seçilmesini belirleyen en önemli ölçüt olmuştur. Bu kapsamda tezde, yükseklik bileşeni R^2'i yaklaşık olarak 0,85'ten büyük olan istasyonlar ile çalışılmıştır.

Yüksek R^2 değerli istasyon tespiti yapılırken buzul sonrası geri çekilmenin izlendiği ek bir çalışma yapılmasına karar verilmiştir. Söz konusu çalışmanın yapılmasını tetikleyen unsur, istasyon seçimi aşamasında; buzul sonrası çekilmeden etkilendiği bilimsel olarak ispatlanan bölgelerde yer alan noktaların zaman ile yükseklik bileşeninin R^2'sinin yüksek ya da başka bir deyişle doğrusal eğilim olduğunun tespit edilmesi olmuştur. Bu kapsamda, doğrusal eğilim görülmeyen ya da başka bir deyişle düşük R^2 değerli istasyonlar da gözlenen istasyonlar arasına dahil edilmiştir. Kriging yöntemiyle sentetik data üretilerek R^2 değerlerinin tüm yeryüzüne dağıtılması

sağlanmıştır. Çalışmanın sonucunda buzul sonrası çekilmeden etkilendiği bilimsel olarak ispatlanan bölgelerde yer alan istasyonların sadece doğu, kuzey bileşenlerinin değil düşey bileşenlerinin de $R^{2'}$nin yüksek olduğu ispat edilmiştir.

IGS istasyonlarına ait günlük zaman serileri her ayın birinci günü alınarak seyreltilmiş ve aylık ya da başka bir deyişle kampanya verisi elde edilmiştir. Sürekli zaman serileri ve kampanya zaman serilerine ait hız bilgisinin üretilmesinde kullanılan matematiksel modelde bilinmeyenler "En Küçük Kareler Yöntemi" ile Matlab programı aracılığıyla çözülmüştür. Yatay hız ve düşey hız bileşenleri 1 yıllık ve 6 aylık mevsimsel etki göz önüne alınarak türetilmiştir.

"En Küçük Kareler Yöntemi" ile kestirilen günlük ve aylık verinin deformasyon oranları 3 farklı varsayıma göre istatistiksel test kullanılarak karşılaştırılmıştır. Varyansın bilindiği ve bilinmediği, verilerin aynı örneklem uzayında ya da farklı örneklem uzayından elde edilip edilmediği durumlar göz önüne alınmıştır. Belirlenen güven aralıklarına göre (Z_{90}=1,645, Z_{95} =1,96, Z_{99} =2,58) deformasyonların kabul edilebilir aralıkta olup olmadığına karar verilmeye çalışılmıştır.

Buna göre Z_{90}=1,645 güven aralığına göre iki uçlu testte;

- AIRA istasyonunun yükseklik bileşeni, DRAG istasyonun boylam bileşeni ve NYAL istasyonunun enlem bileşeninde sürekli veriden elde edilen trend ile kampanya verisinden elde edilen trend, kurulan 3 varsayımda uyumsuz çıkmıştır.
- AIRA istasyonunun enlem ve boylam bileşeni, DRAG istasyonun enlem ve yükseklik bileşeni ve NYAL istasyonunun boylam ve yükseklik bileşeninde, ALGO, ALRT, BAKE, BCOV, CHUR, HOFN, HOLM, IQAL, KIRU, NAIN, ONSA, PALM, PETS, QIKI, RESO, SANT, SCOR, SPTO, THU2, TRO1, YELL istasyonlarının tüm bileşenlerinde sürekli veriden elde edilen trend ile kampanya verisinden elde edilen trend, kurulan 3 varsayımda uyumlu çıkmıştır.
- Yapılan istatistiksel test sonuçlarına göre kampanya ölçümlerinden elde edilen düşey hız bileşeninin % 96'sının sürekli veriden elde edilen hız ile uyumlu olduğu ortaya çıkmıştır. Aynı şekilde kampanya ölçümlerinden elde edilen yatay hız bileşeninin % 92'sinin sürekli veriden elde edilen yatay bileşen hızı ile uyumlu olduğu ortaya çıkmıştır.

Z_{95} =1,96 güven aralığına göre iki uçlu testte;

- AIRA istasyonunun yükseklik bileşeni ve DRAG istasyonun boylam bileşeni kurulan 3 varsayımda, NYAL istasyonunun enlem bileşeni ise 1. varsayım, 2. varsayım ve 3. varsayımda sürekli veriden elde edilen trend ile kampanya verisinden elde edilen trend uyumsuz çıkmıştır.
- AIRA istasyonunun enlem ve boylam bileşeni, DRAG istasyonun enlem ve yükseklik bileşeni, ALGO, ALRT, BAKE, BCOV, CHUR, HOFN, HOLM, IQAL, KIRU, NAIN, NYAL, ONSA, PALM, PETS, QIKI, RESO, SANT, SCOR, SPTO, THU2, TRO1, YELL istasyonlarının tüm bileşenlerinde sürekli veriden elde edilen trend ile kampanya verisinden elde edilen trend, kurulan 3 varsayımda uyumlu çıkmıştır.
- Yapılan istatistiksel test sonuçlarına göre kampanya ölçümlerinden elde edilen düşey hız bileşeninin % 96'sının sürekli veriden elde edilen hız ile uyumlu olduğu ortaya çıkmıştır. Aynı şekilde kampanya ölçümlerinden elde edilen yatay hız bileşeninin % 96'sının sürekli veriden elde edilen yatay bileşen hızı ile uyumlu olduğu ortaya çıkmıştır.

Z_{99} =2,58 güven aralığına göre iki uçlu testte;

- AIRA, ALGO, ALRT, BAKE, BCOV, CHUR, DRAG, HOFN, HOLM, IQAL, KIRU, NAIN, NYAL, ONSA, PALM, PETS, QIKI, RESO, SANT, SCOR, SPTO, THU2, TRO1, YELL istasyonlarının tüm bileşenlerinde sürekli veriden elde edilen trend ile kampanya verisinden elde edilen trend, kurulan 3 varsayımda uyumlu çıkmıştır.
- Yapılan istatistiksel test sonuçlarına göre kampanya ölçümlerinden elde edilen düşey hız bileşeninin % 100'ünün sürekli veriden elde edilen hız ile uyumlu olduğu ortaya çıkmıştır. Aynı şekilde kampanya ölçümlerinden elde edilen yatay hız bileşeninin % 100'ünün sürekli veriden elde edilen yatay bileşen hızı ile uyumlu olduğu ortaya çıkmıştır.

Akarsu (2012)'deki bulgular dikkate alınarak GPS kampanyalarında ölçüm süresi 8-12 saat'ten 24 saate çıkartıldığında elde edilen deformasyon oranı doğruluğunun %95 üzerinde ve arzu edilen istatistiksel güven düzeyi (Z90=1,645, Z95 =1,96, Z99 =2,58) kapsamında olduğu görülmektedir. Buzul sonrası geri çekilmeden etkilendiği bilimsel olarak ispatlanan bölgelerde yer alan IGS istasyonlarının doğu, kuzey hız

bileşenlerinin yanında düşey hız bileşenlerinin R^2'nin de yüksek olduğu ortaya konmuştur.

Bu çalışma sonucunda tektonik hareket ve buzul sonrası erime ile oluşan kabuk deformasyonunun 24 saatlik gözlem ve aylık kampanyalarla sürekli gözlemlerden elde edilen kaliteye yakın bir seviyede belirlenebileceği gösterilmiştir. Burada özellikle gözlem süresinin 8-10 saatten 24 saate uzatılmasının rolü büyük olmuştur. Yüzde 30-40 seviyelerindeki yatay hız kestirim doğruluğu ve %0 seviyesindeki düşey hız kestirim doğruluğu %95 seviyesine çıkarılmıştır. Ayda bir sıklıkta yapılan kampanya gözlemleri düşey sinyalin belirlenmesinde önemli bir rol oynamasına rağmen pratikte yine gözlemciye ağır maliyetler, iş gücü ve zaman kaybı getirecektir. Bu nedenle bundan sonraki çalışmalarda kampanya ölçmelerinin sıklığı ayrıca çalışılmalı ve bunun hız kestirim doğruluğu üzerine etkisi ayrıca incelenmelidir.

KAYNAKLAR

Akalın, S. (1990). *İşletme istatistiği*. Bayraklı Matbaacılık. İzmir.

Akarsu, V. (2012). *Gözlem süresinin GPS noktası hızlarının belirlenmesine olan etkisinin araştırılması*. (Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul).

Akarsu, V., Şanlı, D. U. ve Arslan, E. (2015). Accuracy of velocities from repeated GPS measurements. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *15*(4), 875-884.

Aktaş, S. ve Yılmaz, O. (2013). Meşcere taslak haritalarının mekansal tahmin yöntemleri ile üretilmesi. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, *62*(2), 129-144.

Alçay, S. ve Inal, C. (2010). Global bir ağda GPS/GLONASS, GPS ve GLONASS sonuçlarının karşılaştırılması. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakülte Dergisi*, *c.25*(1).

Alkan, R.M., Ozulu, İ. M. ve İlçi, V. (2017). Klasik GNSS veri değerlendirme yazılımlarına alternatif olarak webtabanlı online değerlendirme servisleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, AKÜ FEMÜBİD 17.025502*, 603-619.

Ashurkov, S. V., San'kov, V. A., Miroshnıchenko, A. I., Lukhnev, A. V., Sorokin, A. P., Serov, M. A. ve Byzov, L. M. (2011). GPS geodetic constraints on the kinematics of the amurian plate. *Russian Geology and Geophysics*, *52*(2), 239-249.

Atasoy V. (1991). Yersel Yöntemlerle ölçülen jeodezik ağların üç boyutlu dengelenmesi. *Harita ve Kadastro Mühendisliği Dergisi*, *68*, 23-29.

Baysal, D., Aktuğ, B. ve Koçyiğit A. (2010). GPS nokta koordinatlarındaki zamana bağlı değişimlerin analizi ve yorumu: izmir bölgesinde uygulama. *Harita Dergisi, Temmuz 2010, Sayı 144*.

Blewitt, G. (1997). Basics of the GPS technique: Observation equations. *Geodetic Applications of GPS*, 10-54.

Blewitt, G. (2015). GPS and space-based geodetic methods. *In:Gerald Schubert (editör-in-chief) Treatise on Geophysics, 2nd Edition, Vol 3.* Oxford: Elsevier; 307-338.

Blewitt, G. ve Lavallée, D. (2002). Effect of annual signals on geodetic velocity. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B7).

Calais, E. (1999). Continuous GPS measurements across the Western Alps, 1996–1998. *Geophysical Journal International*, *138*(1), 221-230.

Catalão, J., Nico, G., Hanssen, R. ve Catita, C. (2011). Merging GPS and atmospherically corrected InSAR data to map 3-d terrain displacement velocity. *Ieee Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, *49*(6), 2354-2360.

Chen, Q., Van Dam, T., Sneeuw, N., Collilieux, X., Weigelt, M. ve Rebischung, P. (2013). Singular Spectrum analysis for modeling seasonal signals from GPS time series. *Journal of Geodynamics*, *72*, 25-35.

Chip Dergisi (2015). GPS sisteminin bir alternatifi var GLONASS. (2017, 10 Nisan). Erişim adresi https://www.chip.com.tr/haber/glonass-hakkinda-sey-nasil-calisiyor_51874_2.html

Dong, D., Fang, P., Bock, Y., Cheng, M. K. ve Miyazaki, S. I. (2002). Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *107*(B4).

DPT. (2001). *Sekizinci beş yıllık kalkınma planı harita, tapu kadastro, coğrafi bilgi ve uzaktan algılama sistemleri özel ihtisas komisyonu raporu*. Devlet Planlama Teşkilatı Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Ankara.

Eckl, M. C., Snay, R. A., Soler, T., Cline, M. W. Ve Mader, G. L. (2001). Accuracy of GPS-derived relative positions as a function of ınterstation distance and observing-session duration. *Journal of Geodesy*, *75*(12), 633-640.

Elliott, J. L., Larsen, C. F., Freymueller, J. T. ve Motyka, R. J. (2010). tectonic block motion and glacial ısotatic adjustment in southeast alaska and adjacent kanada constrained by GPS measurements. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *115*(B9).

Erdoğan, S., Güllü, M., Baybura, T. ve Tiryakioğlu, İ. (2005). Global konum belirlemede hata kaynakları. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, *2005*, (2), 47-52.

Fleming, K., Johnston, P., Zwartz, D., Yokoyama, Y., Lambeck, K., & Chappell, J., Milne G. ve Shennan I. (1998). *Sea level studies: Isostasy*. Durham University, Durham, UK. Science, 288, 1033-1035.

Fjeldskaar, W. (1997). Flexural rigidity of fennoscandia ınferred from the postglacial uplift. *Tectonics*, *16*(4), 596-608.

Gasperini, P. ve Sabadini, R. (1990). Finite element modeling of lateral viscosity heterogeneities and post glacial rebound. *Tectonophysics*, *179*(1-2), 141-149.

Gezgin, C. ve Acar, M. (2016). GNSS gözlem sürelerinin baz çözümleri ve konum doğruluğuna olan etkisinin araştırılması: Aksaray kampüs GNSS ağı örneği, *HKMO-Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu 8. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, 19-21 Ekim 2016, Yıldız Teknik Üniversitesi.

Giunchi, C., Spada, G. ve Sabadini, R. (1997). Lateral viscosity variations and post glacial rebound: effects on present day VLBI baseline deformations. *Geophysical Research Letters, 24*(1), 13-16, İstanbul.

Hastaoglu, K. O. ve Sanlı, D. U. (2011a). Monitoring koyulhisar landslide using rapid static GPS: a strategy to remove biases from vertical velocities. *Natural Hazards*, *58*(3), 1275-1294.

Hastaoglu, K. O. ve Sanlı, D. U. (2011b). Accuracy of GPS rapid static positioning: application to koyulhisar landslide, central Turkey. *Survey Review*, *43*(321), 226-240.

Hegarty, C. J., Foley, J. M. ve Kalyanaraman, S. K. (2017). *Global positioning system*. Digital Avionics Handbook.

Herring, T. (2010). *Geodesy: Treatise on geophysics*. Elsevier. p367.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. ve Wasle, E. (2007). GNSS–global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. *Springer Science & Business Media.*

International GNSS Service. (2016). RINEX: The receiver independent exchange format version 2. Erişim adresi ftp://igs.org/pub/data/format/rinex2.txt

International GNSS Service. (2017). IGS products. (2017, 5 Nisan). Erişim adresi http://www.igs.org/products

Kaplan, E., ve Hegarty, C. (2005). Understanding GPS: principles and applications. *Artech House*.

Kara, T. (2009). *Sabit GPS istasyonlarında zaman serileri analizi*. (Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya).

Karaali, C. ve Yıldırım. C. (1996). Global konum belirleme sistemi (GPS). *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,Cilt:2, Sayı:2,* 103-108.

Kaufmann, G. ve Lambeck, K. (2000). Mantle dynamics, postglacial rebound and the radial viscosity profile. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, *121*(3-4), 301-324.

King, M. A., Altamimi, Z., Boehm, J., Bos, M., Dach, R., Elosegui, P., ... ve Penna, N. (2010). Improved constraints on models of glacial isostatic adjustment: A review of the contribution of ground-based geodetic Observations. *Surveys in Geophysics*, *31*(5), 465-507.

Kouba, J. (2009). A guide to using international GNSS service (IGS) products. (2018, 24 Mart). Erişim adresi http://acc.igs.org/UsingIGSProductsVer21.pdf

Kurt, A. İ. ve Deniz, R. (2010). Deformasyon hızlarının iyileştirilmesinde sabit GPS istasyonları zaman serileri analizinden yararlanılması. *Harita Dergisi*, 144, 20-28.

Kurt, O. (2013). Üç boyutlu ağların dengelenmesi. *Prof. Dr. Ergün ÖZTÜRK Jeodezi Kolokyumu, TMMOB-HKMO*, 15 Mart 2013, Kocaeli.

Lambeck, K., Smither, C. ve Ekman, M. (1998). Tests of glacial rebound models for fennoscandinavia based on instrumented sea and lake level records. *Geophysical Journal International*, 135(2), 375-387.

Mann, S.P. (1995). *Statistics for business and economics.* Wiley. USA

Mao, A., Harrison, C. G. ve Dixon, T. H. (1999). Noise in GPS coordinate time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B2), 2797-2816.

Mekik, Ç. (2010). Global uydu navigasyon sistemleri ve uydu bazlı alan büyüme sistemleri. *CeBIT - Eurasia 2010 Coğrafi Bilgi Teknolojileri Çalıştayı*, "Akademik Perspektif", 8 Ekim 2010, İstanbul.

Milne, G., ve Shennan, I. (2013). Sea level studies| Isostasy: Glaciation-ınduced Sea-Level Change. *Encycopledia of Quatemary Science (Ed 2*), 452-459.

NASA. (2012). Global positioning system history. (2017, 01 Ocak). Erişim adresi https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS_History.html

NASA. (2015). Nasa rimex files. (2017, 07 Ocak). Erişim adresi https://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rimex2.txt

NASA. (2016). Introduction to JPL's GPS time series, (2017, 08 Ağustos). Erişim adresi https://sideshow.jpl.nasa.gov/post/tables/GPS_Time_Series.pdf

Navigation Center. (2018). GPS Constellation Status for 02/03/2018. U.S. Department of Homeland Security, United States Coast Guard, Navigation Center of Excellence. (2018, 03 Şubat). Erişim adresi https://www.navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus

Paternoster, R., Brame, R., Mazerolle, P. ve Piquero, A. (1998). Using the correct statistical test for the equality of regression coefficients. *Criminology*, *36*(4), 859-866.

Peltier, W. R. ve Andrews, J. T. (1976). Glacial isostatic adjustment I. The forward problem. *Geophysical Journal International*, *46*(3), 605-646.

Rangelova, E., Sideris, M. ve Kim, J. (2012) On the capabilities of the multi-channel singular spectrum method for extracting the main periodic and non-periodic variability from weekly GRACE data. *Journal of Geodynamics 54*, 64–78. doi:10.1016/j.jog.2011.10.006

Rontogianni, S. (2010). Comparison of geodetic and seismic strain rates in greece by using a uniform processing approach to campaign GPS measurements over the interval 1994–2000. J*ournal of Geodynamics*, *50*(5), 381-399.

Salgın, O. (2007). *Farklı uzunluktaki bazlarda ticari GPS yazımlarının bernesse yazılımı ile karşılaştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya).

Sanli, D. U. ve Engin, C. (2009). Accuracy of GPS positioning over regional scales. *Survey Review*, *41*(312), 192-200.

Sanli, D. U. ve Kurumahmut, F. (2011). Accuracy of GPS positioning in the presence of large height differences. *Survey Review*, *43*(320), 162-176.

Sanli, D. U. ve Tekic, S. (2010). Accuracy of GPS precise point positioning: a Tool for GPS Accuracy Prediction. *Lambert Acad. Publ*.

Schubert, G. (2015). *Treatise on geophysics*. Elsevier. p.319.

Sevindi, C. (2005). Küresel konum belirleme sistemi (GPS) ve coğrafya araştırmalarında kullanımı. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, *3*(1), 101-112.

Springer, T. A. ve Hugentobler, U. (2001). IGS Ultra rapid products for (near-) real-time applications. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, *26*(6-8), 623-628.

Steigenberger, P., Rothacher, M., Dietrich, R., Fritsche, M., Rulke, A. ve Vey, S. (2006). Reprocessing of a global GPS network. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111.

Şanlıoğlu, İ. ve Kara, T. (2014). Analysis of time series about IGS stations in Turkey using AR and ARMA models, *FIG Congress ,2014, Engaging the Challenges - Enhancing the Relevance*. Kuala Lumpur, Malaysia 16 – 21 June 2014.

Şanlıoğlu, İ. ve İnal, C. (2004). IGS ürünlerinin tanıtımı, IGS ürünlerine erişim ve bir uygulama. *Selçuk-Teknik Dergisi*, *3*(1), 26-40.

Telli, A.K. , Pırtı, A ve Hoşbaş, R. G. (2009). Yeni nesil ölçme sistemi ve evrik GNSS. *Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*, 2009/2.

Tiryakioğlu, I. (2012). GNSS ölçüleri ile güneybatı anadolu'daki blok hareketleri ve gerilim alanlarının belirlenmesi. (Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul).

Trần, Đ. T., Nguyễn, T. Y., Dương, C. C., Vy, Q. H., Zuchiewicz, W. ve Nguyễn, V. N. (2013). Recent crustal movements of northern Vietnam from GPS data. *Journal of Geodynamics*, *69*, 5-10.

Van Dam, T., Wahr, J., Milly, P. C. D., Shmakin, A. B., Blewitt, G., Lavallée, D. ve Larson, K. M. (2001). Crustal displacements due to continental water loading. *Geophysical Research Letters*, *28*(4), 651-654.

Van Diggelen, F. S. T. (2009). *A-GPS: Assisted GPS, GNSS, and SBAS*. Artech House.

Van Sickle, J. (2015). *GPS for land surveyors, fourth edition*. CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN: 978-1-4665-8311-5.

Vermeersen, L. A., Sabadini, R. ve Spada, G. (1996). Analytical visco elastic relaxation models. *Geophysical Research Letters*, *23*(7), 697-700.

Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L. ve Ye, K. (1993). *Probability and statistics for engineers and scientists (Vol. 5)*. New York: Macmillan.

Wdowinski, S., Bock, Y., Zhang, J., Fang, P. ve Genrich, J. (1997). Southern California permanent GPS geodetic array: Spatial filtering of daily positions for estimating coseismic and postseismic displacements induced by the 1992 Landers earthquake. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *102*(B8), 18057-18070.

Wu, P. (2005). Effects of lateral variations in lithospheric thickness and mantle viscosity on glacially ınduced surface motion in laurentia. *Earth and Planetary Science Letters*, *235*(3-4), 549-563.

Yaprak, S., & Arslan, E. (2008). Kriging yöntemi ve geoit yüksekliklerinin enterpolasyonu. *HKM Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi*, *98*, 36-42.

Zhong, S., Paulson, A. ve Wahr, J. (2003). Three dimensional finite element modelling of Earth's viscoelastic deformation: Effects of lateral variations in lithospheric thickness. *Geophysical Journal International, 155*(2), 679-695.

EKLER

EK A: GPS aktif uydu listesi.

EK B: EKK modelini çalıştıran Matlab kodu.

EK C: Jeodezik GPS veri değerlendirme yazılımı.

EK D: Gerçek zamanlı GPS doğruluğunun gecikme ile ilişkisi.

EK E: Paternoster ve diğ. (1998) istatistiki varsayımı.

EK F: IGS noktalarındaki hız değişim grafikleri.

EK A: GPS aktif uydu listesi.

Çizelge A.1: GPS Aktif Uydu Listesi.

	Düzlem	Slot	SVN	PRN	Blok-Tipi	Saat
1	A	1	65	24	IIF	CS
2	A	2	52	31	IIR-M	RB
3	A	3	64	30	IIF	RB
4	A	4	48	7	IIR-M	RB
5	B	1	56	16	IIR	RB
6	B	2	62	25	IIF	RB
7	B	3	44	28	IIR	RB
8	B	4	58	12	IIR-M	RB
9	B	5	71	26	IIF	RB
10	B	6	51	20	IIR	RB
11	C	1	57	29	IIR-M	RB
12	C	2	66	27	IIF	RB
13	C	3	72	8	IIF	CS
14	C	4	53	17	IIR-M	RB
15	C	5	59	19	IIR	RB
16	D	1	61	2	IIR	RB
17	D	2	63	1	IIF	RB
18	D	3	45	21	IIR	RB
19	D	4	67	6	IIF	RB
20	D	5	46	11	IIR	RB
21	E	1	69	3	IIF	RB
22	E	2	73	10	IIF	RB
23	E	3	50	5	IIR-M	RB
24	E	4	54	18	IIR	RB
25	E	6	47	22	IIR	RB
26	F	1	70	32	IIF	RB
27	F	2	55	15	IIR-M	RB
28	F	3	68	9	IIF	RB
29	F	4	60	23	IIR	RB
30	F	5	41	14	IIR	RB
31	F	6	43	13	IIR	RB

Kaynak: Navigation Center, 2018.

EK B : EKK modelini çalıştıran Matlab kodu.

```
LDoğu Squares Estimation: Results copied into a single
file

% modified LSE2.m; results are presented in 16 digits!
load des_AIRA.csv
X = des_AIRA;
load meas_Düşey.csv;
y=meas_Düşey;
[~,bint,r,rint,stats]=regress(y,X);
[b,se_b,mse]=lscov(X,y);
t = b./se_b;
results = fopen('resultsDüşey33.txt', 'wt');
fprintf(results,'Estimated Parameters\n');
fprintf(results,'%6.16f\n',b);
%fprintf(results,'Confidence Intervals\n');
%fprintf(results,'%6.4f\n',bint);
fprintf(results,'mse\n');
fprintf(results,'%6.8f\n',mse);
fprintf(results,'Standard errors of estimated
parameters\n');
fprintf(results,'%6.8f\n',se_b);
fprintf(results,'t-statistics\n');
fprintf(results,'%6.4f\n',t);
fprintf(results,'R-square etc.\n');
fprintf(results,'%6.4f\n',stats);
fclose(results)
%save unknowns b -ascii
%save confidence bint -ascii
%save residuals r -ascii
%save t-statistic t -ascii
%save statistics se_b mse stats –ascii
```

Şekil B.1: EKK Matlab Kodu.

EK C: Jeodezik GPS veri değerlendirme yazılımı.

Araştırma yazılım paketleri tarafından uygulanan jeodezik GPS veri değerlendirmesi uygulamaları bilimsel şema olarak genelleştirilebilir. Bu araştırma modelinde, GPS alıcılarından sağlanan kaba veri ile analizi istasyon koordinat setinin üretimiyle sona erer.

İlk istasyon koordinatlarının üretilmesi ile veri değerlendirmesi sona ermez. Bu zaman serisi analizi, hız tahmini ve kinematik analiz ve tüm önde gelen dinamik analiz ve jeofiziksel yorumlamaların ilk adımıdır. GPS verilerinin gerçek değerlendirilmesi ile sonraki kinematik analizin birbirinden ayrılması gerekiyor. Fakat bazı jeofiziksel uygulamalar için doğru değildir. Jeofiziksel parametrelerin çözümde direkt olarak tahmin edilmesi gerekmektedir.

Uzun hat çizgilerinde yüksek jeodezik hassasiyet sağlamada yetenekli birçok yazılım paketi 1980 lerden beri geliştirilmektedir. Bu günlerde, bahse konu yazılım paketleriyle GPS veri analizinde, büyük ölçüde, otomatik veya en azından "kara kutu"(*black box*) yöntemi yaygındır. Kara kutu GPS metedolojisi araştırmaları için incelenebilmektedir. Fakat otomatik kontrolün en önemli avantajı yeniden üretilebilirliği ve sonuçların tutarlılığıdır.

Jeodezik veri değerlendirme yazılımı, ağırlıklı olarak üniversitelerin ve devletlerin araştırma laboratuvarlarında yapılan yoğun jeodezik araştırmaların bir ürünüdür. Bu tarz yazılımlar tipik olarak :

- Uygun kuvvet modelleri ile yörünge entegrasyonunu,
- Yersel ve göksel referans sistemleri ile doğru gözlem modelini (yeryüzü modeli, ortam gecikmesi vb.),
- Güvenilir veri düzenlemesini (faz sıçramaları),
- Koordinatların, yörüngelerin, troposferik hataların, alıcı saat hataları, kutup hareketi ve yeryuvarı dönüş hızının tahminini,
- Uzun mesafelerde uygulanabilen belirsizlik çözüm algoritmalarını,
- Referans çerçevesi dönüşüm parametrelerinin, dönüşüm parametrelerinin tahmini ve istasyon pozisyonlarının plaka tektoniğine ve kosismik yer değişimlere göre içermektedir.

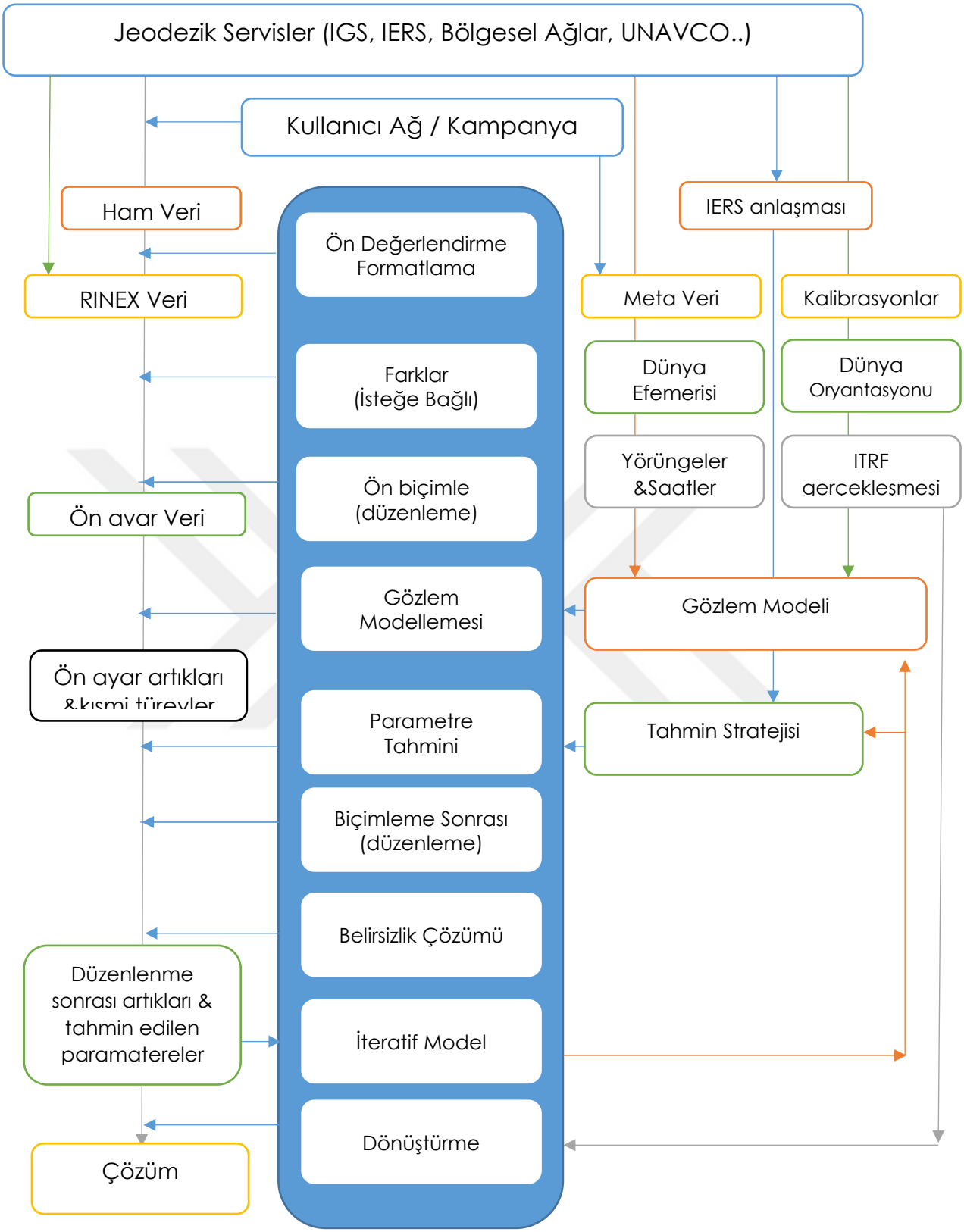
24 saatlik veri değerlendirmesi tipik jeodezik sonuçların kalitesi:

- Hat uzunluğunun milyonda biri seviyesinde bağıl konum belirleme,
- ITRF'te düşeyde ~6 mm , ~3 mm yatayda jeosentrik konum belirleme,
- ~4 mm troposferik gecikme tahmini,
- GPS yörüngelerinin ~25 mm ile belirlenmesi,
- Kutup noktası konumunun ~2 mm belirlenmesi,
- Saat senkronizasyonu (bağıl hata tahmini) <1.1 ns,
- İyonosferik TEC haritaları <10 TEC birimi dir.

Ticari yazılımların daha gelişmiş yazılım paketlerinden iki önemli eksiği vardır. Bunlardan birincisi; bazen çift farklar uygulanmaz, onun yerine farkları alınmayan veri değerlendirilir ve saat hataları tahmin edilir. İkincisi ise ağ dengelemesinde baz çözümleri gereksizdir. Gelişmiş paketler tüm GPS gözlemlerinden direkt olarak istasyon koordinat dengelemesi yaparlar.

Bazı hassas yazılım paketleri Kalman filtresi ile çalışır. Böylece stokastik modele göre zaman içinde değişen belli parametreler için uygundur. Tipik olarak, 'random walk' yöntemiyle zaman içinde değişen troposferik hata için kullanılır. Filtre aynı zamanda saat hatalarını tahmininde kullanılır. Saat hataları tahmininde "*White noise*" yaklaşımının teorik eşdeğerinin çift farklar olduğu yerde, filtre saat hataları tahmininde kullanılabilir.

Birçok paket geliştirilmiş olmasına rağmen, dünyada araştırmacılar tarafından yaygın bir şekilde kullanılarak akademik literatürde atıf yapılan üç tane ultra yüksek hassasiyetli yazılım paketi vardır:



Şekil C.1: Jeodezik GPS Veri Değerlendirmesi için Tanıtıcı Modüler Şema.

- Bernese yazılımı, Bern Üniversitesi Astronomik Enstitüsü, İsviçre
- GAMIT-GLOBK yazılımı, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü, Amerika Birleşik Devletleri
- GIPSY-OASIS II yazılımı, Jet Poropulsion Laboratory, Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü, Amerika Birleşik Devletleri

Birçok farklı paket olmasına rağmen, bu paketler onları yazan enstitü ile sınırlı kalmaktadır. Ticari yazılım paketlerinden farklı olarak bahsi geçen yazılım paketleri, yazılımın hangi şartlar ve durumda en iyi kullanılabileceğini anlamak ve yazılımı kavramak için önemli bir yatırım ihtiyacı yarattığı ortadadır.

EK D: Gerçek zamanlı GPS doğruluğunun gecikme ile ilişkisi.

Uydu yörüngeleri, uydu saat parametreleri, yeryüzü dönüş parametreleri ve istasyon koordinatları için en doğru GPS jeodezik çözümler anlık tahminler ile sağlanmaktadır. Diğer yandan, eş zamanlı tahminden farklı olarak çözüme çok yaklaşan iki adımlı metot vardır. Bu metotta ilk olarak uydu yörünge ve saat parametereleri ve yeryüzü rotasyon parametreleri analiz merkezi tarafından hazırlanır. Daha sonra kendi istasyon koordinatlarını çözmek içinistasyon saati, troposferik gecikme ve taşıyıcı faz kayıklığı (hata) ile birlikte kullanıcılara dağıtılır. Bu model IGS ve analiz merkezi tarafından kullanılarak veriler kullanıcılarına servis edilir.

Bu iki aşamalı modelin bir sonucu vardır o da kullanıcı yörünge parametreleri hazır olana kadar beklemek zorundadır. Anlık konum belirlemede ekstrem durumlarda bu iki aşamalı modelin doğru bir şekilde uygulanmasında çeşitli zorluklar meydana gelebilmektedir. Bu durumda, hem veri farkı alan kullanıcılar hem de uydu saat hatalarını gerçek zamanlı tahmin eden analiz merkezleri tarafından uydu pozisyonlarını vaktinden önce tahmin edilmeli ve uydu saatleri gerçek zamanlı olarak ele alınmalıdır.

Örneğin, konum 24 saatin ortalamasını veya her veri aralığındaki yeni pozisyonu da gösterebilir. Bu her beş dakikada bir de olabilir her bir saniyede de ya da daha kısa aralıklarda. Her aralıkta konum belirleme biraz yanlış olarak ‘kinematik konum belirleme’ olarak adlandırılabilir. Bu konum belirlemede hız gibi kinematik parametrelerden ziyade konumlar direkt olarak tahmin edilir. Buna rağmen, kinematik pozisyonlama terimi genel geçer bir standart olduğu için kullanılır.

En doğru final yörüngeleri ve saatler 12-13 gün gecikme ile elde edilebilir (Bazıları 5 günden daha küçüktür). ITRF sisteminde 24 saatlik PPP RINEX dosyalarının yatay hassasiyeti ~2 mm düşey de ise 6 mm olabilmektedir. Bir günden fazla RMS dağılımı için, kinematik konum belirlemede hassasiyet yatayda ~7 mm düşeyde ~20 mm dir. Fakat, RMS hassasiyeti daha kısa zaman aralıklarında çok daha iyi olabilir. Bu sayede sismolojik dalgalar tarafından meydana gelen konum değişimlerinin izini sürmek mümkündür. “Hassasiyet” terimi kullanılırken zaman penceresinin probleme uygun olarak seçilmesi gerekmektedir.

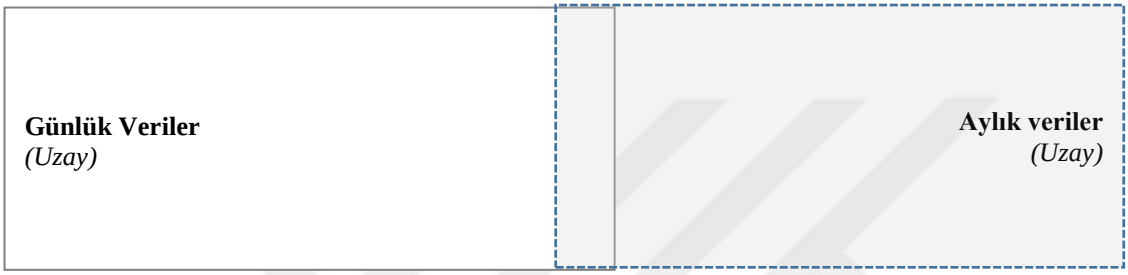
GPS analiz merkezleri aynı zamanda, 1-2 gün gecikme ile “hızlı yörünge” olarak adlandırılan yörüngeyi üretir. Bu ürünler “final yörüngeleri” kadar iyi olup kalite

kontrolü kısa gecikmede etkili olmayabilir. Fakat sonuç olarak, hızlı yörünge kullanılarak elde edilen konum belirleme hassasiyeti final yörünge kullanıcılara elde edilen hassasiyetle hemen hemen aynıdır.

Daha düşük gecikmelerde; GPS analiz merkezleri, aynı zamanda birkaç saat gecikmeli ultra hızlı yörünge üretirler (bazıları 1-2 saat gecikmeyle). Bu durum son gün ya da diğer günler birleştirilmiş saatlik RINEX dosyalarının analizine dayanır. Ultra hızlı yörüngeler, düşük gecikmeli kinematik konum belirleme problemleri için faydalıdır. Örneğin, istasyonların büyük bir depremden sonra kalıcı yer değiştirmelerinin ölçülmesi gibi. Ultra hızlı yörüngeleri kullanan kinematik konum belirleme hızlı yörünge kullananlardan yatayda 10 mm, düşeyde 30 mm ile sadece çok az daha kötüdür. Fakat düşük gecikmelerde kalite kontrolünün daha zor olması geçmiş zamanlı verinin kullanılması gibi nedenlerden ötürü elde edilen çözümler etkilenir. Sonuç olarak ultra hızlı yörüngeler kullanılarak elde edilen konum belirleme kalitesinde öngörülmeyen bir şekilde hatalar ile karşılaşılabilir. Gerçek zamanlı nokta konum belirlemede, ultra hızlı yörüngelerin gelecekteki konumlarını tahmin etmek yeterlidir. Fakat uydu saatleri doğru bir şekilde tahmin edilemediği için kalite kontrolü ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, kullanıcı tarafından ne zaman yeni bir uydu görüş alanına girse veya faz sıçraması tespit edilse taşıyıcı faz hatalarında zayıf ilk tahminler gibi sorunlarla karşılaşılmaktadır.

EK E: Paternoster ve diğ. (1998) istatistiki varsayımı.

Paternoster ve diğ. (1998) tarafından kriminoloji çalışmasında regresyon katsayılarının eşitliği için kullanılan alternatif bir başka varsayıma göre; sürekli (günlük) verinin miktar olarak kampanya (aylık) verisinden çok büyük olduğu, bu yüzden günlük verinin serbestlik derecesinin aylık verinin serbestlik derecesinden çok büyük olduğu ve standart sapmasının (σ) bilindiği varsayılmıştır. Varsayıma göre günlük ve aylık veriler iki ayrı uzayın örneklemlerdir, ayrıca çalışma doğrulanmış Z testinin kullanılacağı bir alan olarak düşünülmüştür.



Şekil E.1: Varsayım'ın Temsili Gösterimi.

Bilindiği üzere: "*Bir evren dağılımı olan Z dağılımının küçük örneklemlerde kullanılabilmesi maksadıyla yapılan düzeltme ile "t dağılımı" geliştirilmiştir."*

E ortalaması (μ) ve serbestlik derecesi (V) normal dağılım eğrisinden farklı olarak t dağılımının şeklini belirlemektedir. T dağılımında, serbestlik derecesi tek örneklemlerde, örneklem büyüklüğünün 1 eksiği yani (n-1)'e, iki örneklem söz konusu olduğunda ise örneklem büyüklüklerinin toplamının 2 eksiği yani ($n_1 + n_2 -2$)'ye bölme gibi bir düzeltme yapılır. Çünkü küçük örneklemde yapılan kestirimlerde evren değerlerinden (parametreler) uzaklaşma ihtimali çok daha yüksektir.

Evren varyansının bilinmediği küçük örneklemlerde ortalamalar arası farkların test edilmesine yönelik hipotez testlerinde, karar verilmesi aşamalarında t dağılımı ve t değerleri kullanılmaktadır. Yazar ikinci örneklemin küçük olduğu için t testinden z testine çıkarım yapmaya çalışmıştır.

İki farklı uzaydan alınan örneklemlerin anlamlıklarının kıyaslanmasında "t testi" kullanılmaktadır. T testinin standart sapması S_p ile gösterilmektedir. S_1 birinci örneklemin standart sapmasını, S_2 ise ikinci örneklemin standart sapmasını

göstermektedir. n_1 birinci örneklemin numune sayısını, n_2 ikinci örneklemin numune sayısını göstermektedir.

$$S_P{}^2 = \frac{(n_1-1)S_1{}^2+(n_2-1)S_2{}^2}{n_1+n_2-2} \quad \text{(E.1)}$$

Söz konusu makalede de standart sapma "σ" ile ifade edilmiş serbestlik derecesi ise v ile sembolize edilmiştir.

$$\sigma = \sqrt{\frac{v_1 SE_{b1}{}^2+v_2 SE_{b2}{}^2}{v_1+v_2}} \quad \text{(E.2)}$$

Buradan t dağılımı aşağıdaki formüle göre özetlenmiştir.

$$T = \frac{(\overline{X_1}-\overline{X_2})-(\mu_1-\mu_2)}{S_P\sqrt{\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}}} \quad \text{(E.3)}$$

Dağılımların birbirine dönüştürülmesinde aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$T = \frac{Z}{\sqrt{V/v}} \quad \text{(E.4)}$$

Buradaki "*V*" ki-kare dağılımı temsil etmekte olup "*v*" serbestlik derecesini göstermektedir. Ki kare testinde seçilen örneklerin birbirinden bağımsız olduğu varsayıldığı için "*V*" iki değerin toplamı olarak gösterilmektedir.

$$V = \frac{(n_1-1)S_1{}^2}{\sigma^2} + \frac{(n_2-1)S_2{}^2}{\sigma^2} = \frac{(n_1-1)S_1{}^2+(n_2-1)S_2{}^2}{\sigma^2} \quad \text{(E.5)}$$

Toplam serbestlik derecemiz ise $v = n_1 + n_2 - 2$

Bilindiği üzere bilinmeyen noktasal genel varyans "σ" örnek varyansların bir araya toplanmasından (S_p) elde edilebilmektedir. Bunun tam tersi de doğrudur. Tüm alınan örneklerin aylık veya günlük aynı uzaydan alındığı düşünülmektedir. Bu sebeple "σ" eşit kabul edilmektedir.

Buradan formülümüz ;

$$t = \frac{(\overline{X_1}-\overline{X_2})-(\mu_1-\mu_2)}{\sqrt{\sigma^2\left(\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}\right)}} \Bigg/ \sqrt{\frac{(n_1-1)S_1{}^2+(n_2-1)S_2{}^2}{\sigma^2(n_1+n_2-2)}} \quad \text{(E.6)}$$

şeklinde dönüşmektedir.

Buradan aşağıdaki formül elde edilmiştir.

$$Z = \frac{(\overline{X_1} - \overline{X_2}) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\sigma^2\left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad \text{(E.7)}$$

Varyansların farklı olması durumunda ise sonuç ;

$$Z = \frac{(\overline{X_1} - \overline{X_2}) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\left(\frac{{\sigma_1}^2}{n_1} + \frac{{\sigma_2}^2}{n_2}\right)}} \quad \text{(E.8)}$$

Paternoster ve diğ. (1998)'a göre, $SE_{b1} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n_1}}$; $SE_{b2} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{n_2}}$ olarak kabul etmiş, doğrulanmış Z değerini ise aşağıdaki gibi bulmuştur:

$$Z = \frac{(b-c)}{\sqrt{{SE_{b1}}^2 + {SE_{b2}}^2}} \quad \text{(E.9)}$$

Formülde b; günlük verilerin deformasyon oranını, c: aylık verinin deformasyon oranını, SEb1: Günlük verilerin standart hatasını, SEb2 aylık verilerin standart hatasını sembolize etmektedir.

Aslında Paternoster ve diğ. (1998) doğrulanmış Z değeri literatürde iki farklı örneklem uzayının kıyaslaması ile aynı sonucu vermektedir (Çizelge E.1) Literatürden farklı olarak genelde t testleri z testlerinden çıkarım yapılmaktadır. Paternoster ve diğ. (1998) burada tam ters bir yol izleyerek z testini t testinden elde etmiştir. Ancak sonuç tekrar literatürde yer alan formül olarak ortaya çıktığı için kabul gören neticeler ortaya çıkmıştır.

Bu testte de bir önceki farklı güven aralıklarına göre test yapılmıştır. Aşağıdaki tabloda sonuçlar gösterilmektedir. "Varsayım 4" olarak ifade edilen değerler Paternoster ve diğ. (1998) tarafından kabul edilen yöntemi simgelemektedir.

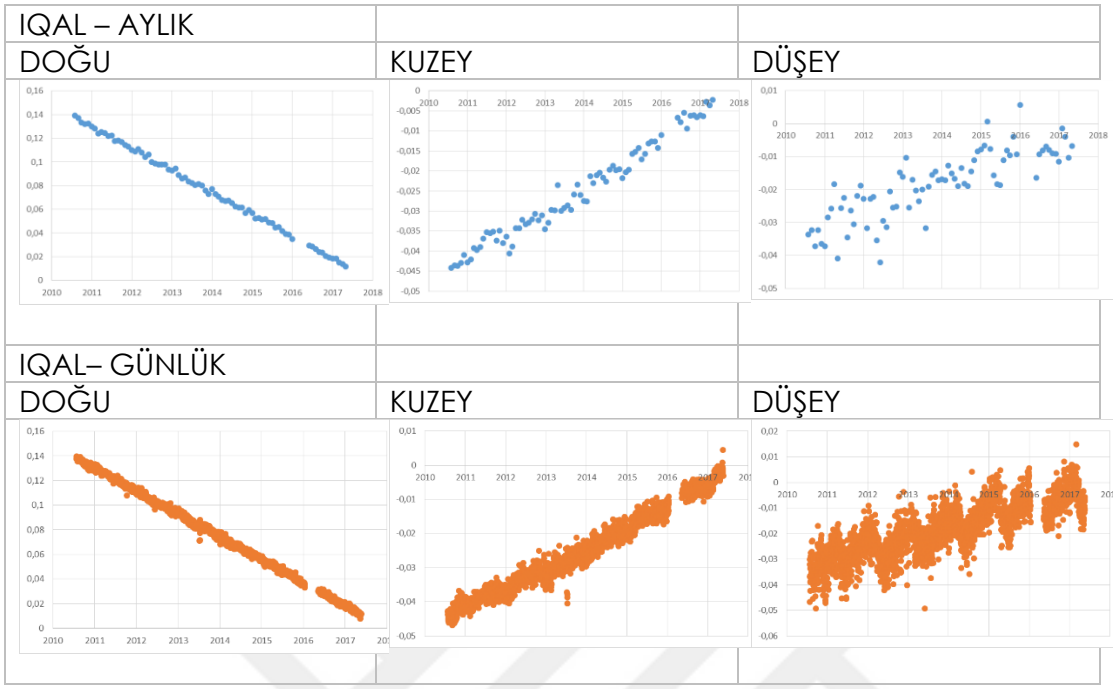
Çizelge E.1: %90, 95, 99 Güven Aralığına Göre Test Sonuçları.

Sıra	İstasyon	Yön	Varsayım: 1	Varsayım 4	Varsayım:2	Varsayım:3
1	**AIRA**	**Doğu**	-0,4673	-0,4328	-0,4590	-0,4328
		Kuzey	0,2332	0,2345	0,2296	0,2345
		Düşey	-2,0741	-2,1135	-2,0435	-2,1135
2	**ALGO**	**Doğu**	-0,5741	-0,6866	-0,5682	-0,6866
		Kuzey	1,2194	1,4097	1,2059	1,4097
		Düşey	1,1857	1,3376	1,1719	1,3376
3	**ALRT**	**Doğu**	0,1093	0,1122	0,1077	0,1122
		Kuzey	-0,0190	-0,0941	-0,0190	-0,0941
		Düşey	-0,4528	-0,4771	-0,4464	-0,4771

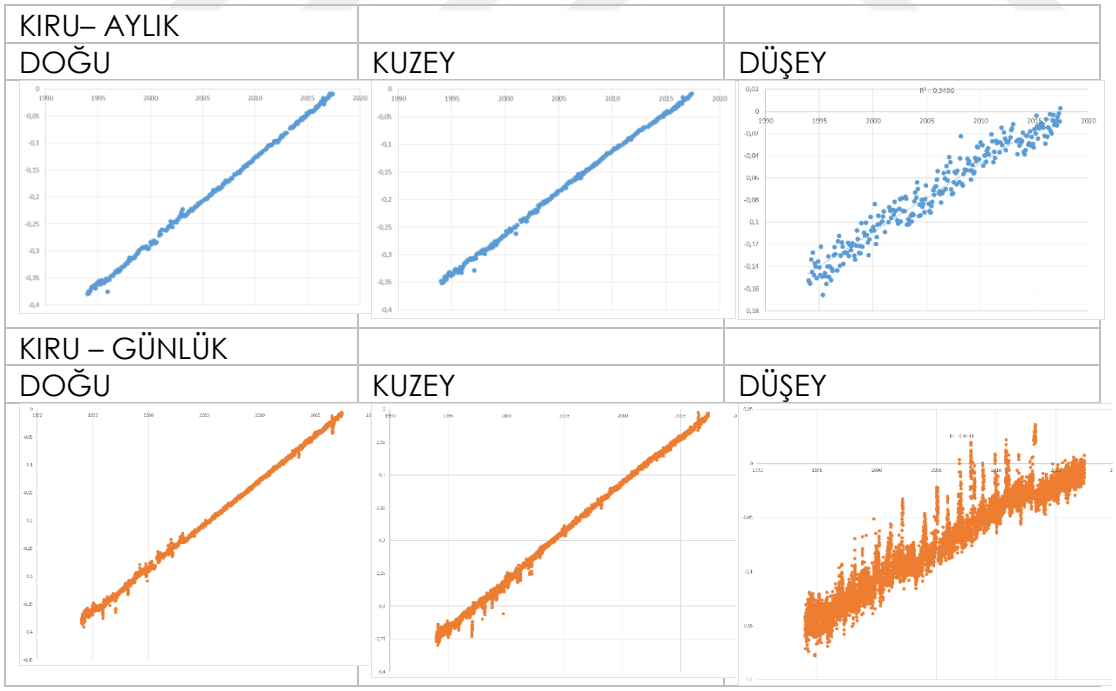
Çizelge E.1 (devam): %90, 95, 99 Güven Aralığına Göre Test Sonuçları.

Sıra	İstasyon	Yön	Varsayım: 1	Varsayım 4	Varsayım:2	Varsayım:3
4	**BAKE**	**Doğu**	-0,6219	-0,5849	-0,6109	-0,5849
		Kuzey	0,2459	0,2412	0,2419	0,2412
		Düşey	1,2298	1,1837	1,2091	1,1837
5	**BCOV**	**Doğu**	-1,1749	-1,2981	-1,1599	-1,2981
		Kuzey	-0,2723	-0,2721	-0,2680	-0,2721
		Düşey	-1,2709	-1,2966	-1,2519	-1,2966
6	**CHUR**	**Doğu**	-0,1430	-0,1367	-0,1406	-0,1367
		Kuzey	-0,4307	-0,4555	-0,4248	-0,4555
		Düşey	0,0515	0,0511	0,0507	0,0511
7	**DRAG**	**Doğu**	-0,3191	-0,3023	-0,3138	-0,3023
		Kuzey	-1,8513	-1,9831	-1,8271	-1,9831
		Düşey	0,0841	0,0836	0,0828	0,0836
8	**HOFN**	**Doğu**	0,2490	0,2376	0,2447	0,2376
		Kuzey	-0,2203	-0,2100	-0,2165	-0,2100
		Düşey	-0,0731	-0,0704	-0,0719	-0,0704
9	**HOLM**	**Doğu**	-0,1884	-0,1921	-0,1855	-0,1921
		Kuzey	0,0734	0,0695	0,0721	0,0695
		Düşey	1,0825	1,1002	1,0662	1,1002
10	**IQAL**	**Doğu**	0,0695	0,0725	0,0685	0,0725
		Kuzey	-0,1684	-0,1781	-0,1660	-0,1781
		Düşey	-0,7709	-0,7412	-0,7579	-0,7412
11	**KIRU**	**Doğu**	1,1827	1,1773	1,1648	1,1773
		Kuzey	0,0082	0,0086	0,0081	0,0086
		Düşey	-0,3175	-0,4077	-0,3147	-0,4077
12	**NAIN**	**Doğu**	0,6650	0,6752	0,6549	0,6752
		Kuzey	0,4360	0,4477	0,4295	0,4477
		Düşey	-0,2334	-0,2188	-0,2292	-0,2188
13	**NYAL**	**Doğu**	1,9428	1,7223	1,9052	1,7223
		Kuzey	-0,3022	-0,3144	-0,2980	-0,3144
		Düşey	0,2416	0,2474	0,2381	0,2474
14	**ONSA**	**Doğu**	0,7136	0,7162	0,7028	0,7162
		Kuzey	-0,0954	-0,1080	-0,0943	-0,1080
		Düşey	-0,6282	-0,7445	-0,6214	-0,7445
15	**PALM**	**Doğu**	0,6364	0,5981	0,6251	0,5981
		Kuzey	-0,7020	-0,6872	-0,6905	-0,6872
		Düşey	-0,4485	-0,4447	-0,4413	-0,4447
16	**PETS**	**Doğu**	-0,0596	-0,0566	-0,0586	-0,0566
		Kuzey	-0,6059	-0,5740	-0,5955	-0,5740
		Düşey	-0,8583	-0,8465	-0,8447	-0,8465
17	**QIKI**	**Doğu**	0,1376	0,7516	0,1376	0,7516
		Kuzey	0,0142	0,0770	0,0142	0,0770
		Düşey	0,0356	0,1934	0,0356	0,1934
18	**RESO**	**Doğu**	-0,1549	-0,1629	-0,1527	-0,1629
		Kuzey	-0,2304	-0,2237	-0,2266	-0,2237
		Düşey	0,1613	0,1547	0,1585	0,1547
19	**SANT**	**Doğu**	0,7918	0,7658	0,7786	0,7658
		Kuzey	-0,9217	-0,8670	-0,9054	-0,8670
		Düşey	-0,0754	-0,0749	-0,0742	-0,0749
20	**SCOR**	**Doğu**	-0,6551	-0,6129	-0,6435	-0,6129
		Kuzey	1,0604	0,9688	1,0408	0,9688
		Düşey	1,1722	1,0618	1,1502	1,0618
21	**SPT0**	**Doğu**	-1,6041	-1,5658	-1,5780	-1,5658
		Kuzey	0,9352	0,8525	0,9178	0,8525
		Düşey	0,0954	0,0868	0,0937	0,0868
22	**THU2**	**Doğu**	-0,0511	-0,0530	-0,0503	-0,0530
		Kuzey	0,5253	0,5761	0,5185	0,5761
		Düşey	-0,4154	-0,4016	-0,4084	-0,4016
23	**TRO1**	**Doğu**	0,0546	0,0552	0,0538	0,0552
		Kuzey	0,1443	0,1307	0,1416	0,1307
		Düşey	0,1663	0,1693	0,1638	0,1693
24	**YELL**	**Doğu**	-0,0650	-0,0657	-0,0641	-0,0657
		Kuzey	0,4801	0,4801	0,4727	0,4801
		Düşey	0,3280	0,3477	0,3235	0,3477

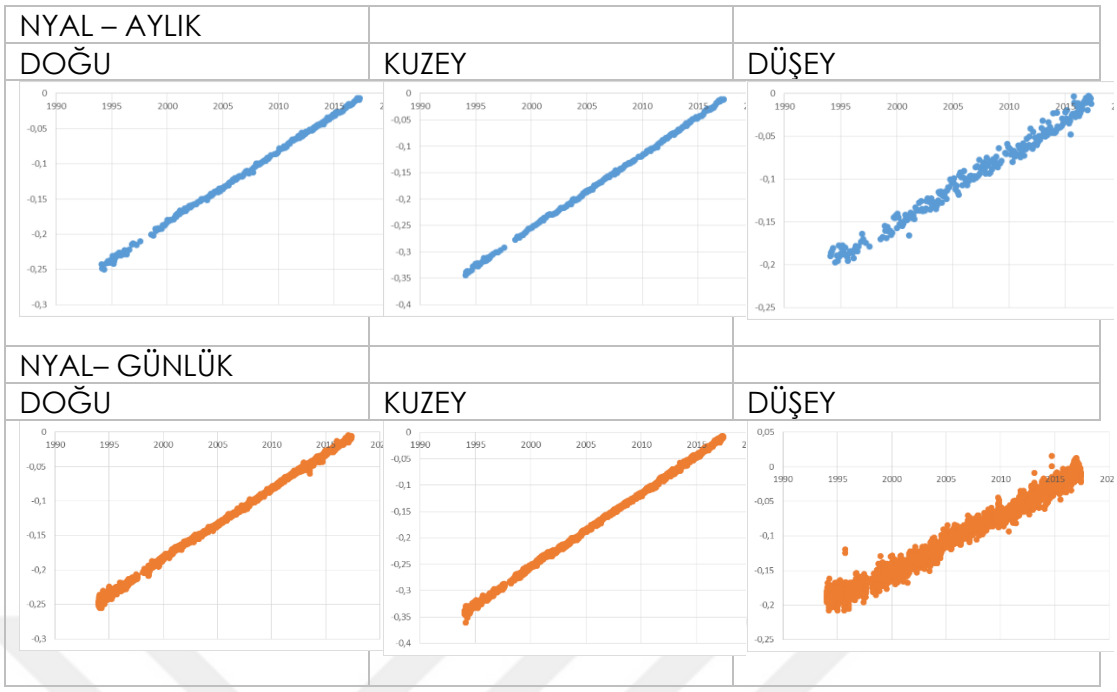
EK F: IGS noktalarındaki hız değişim grafikleri.



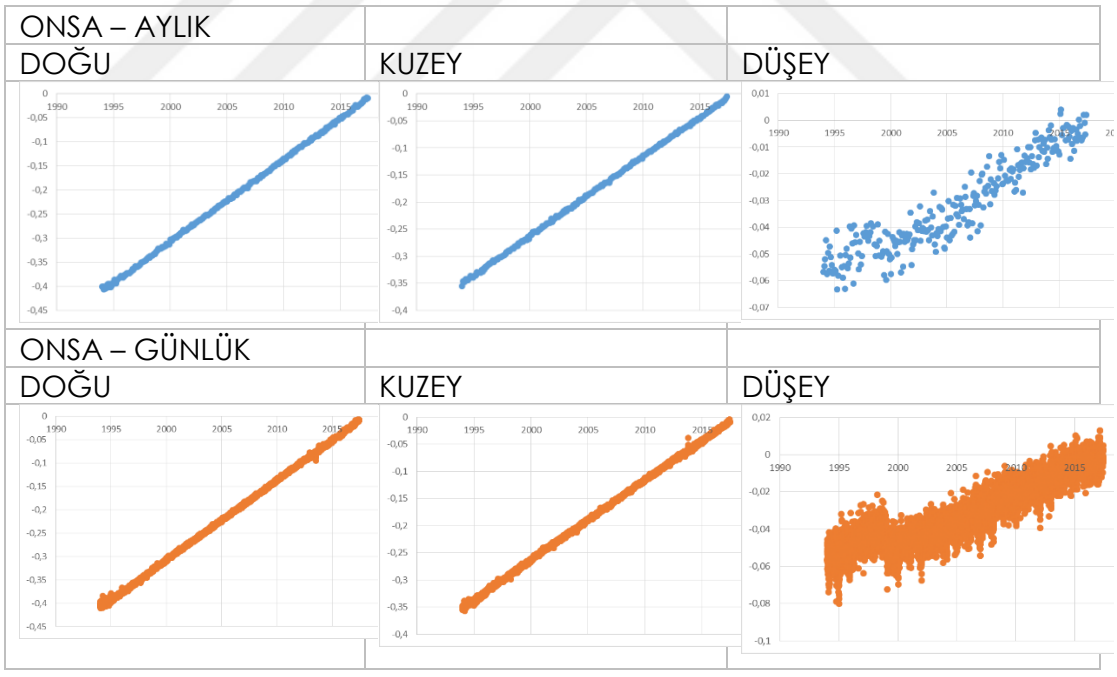
Şekil F.1: IQAL Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



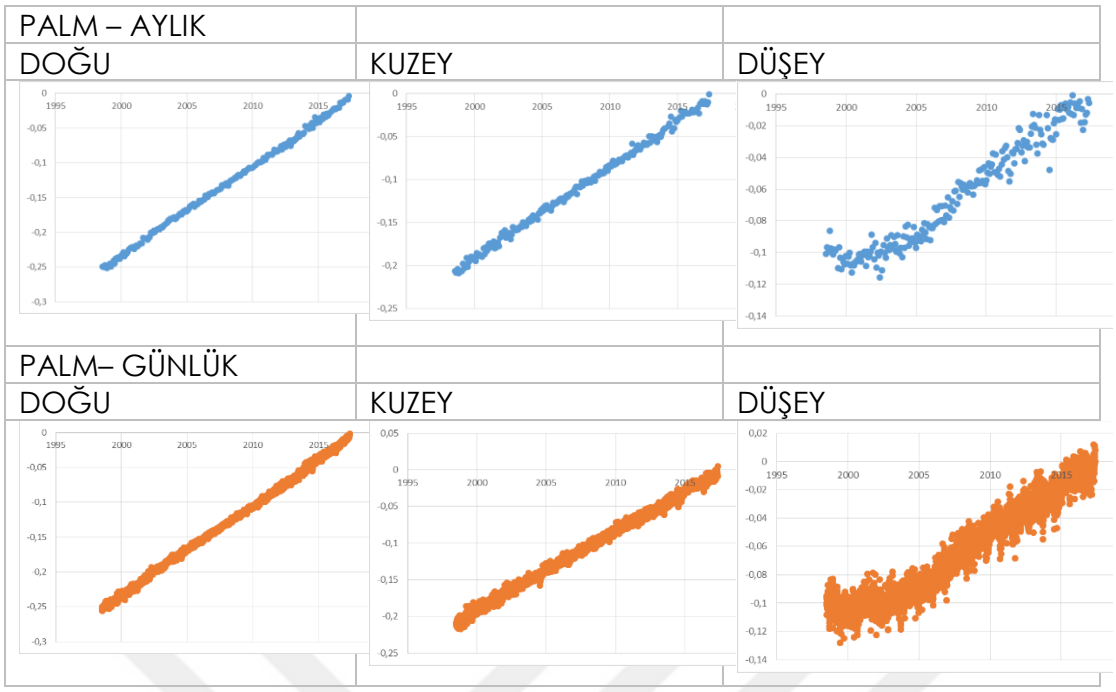
Şekil F.2: KIRU Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



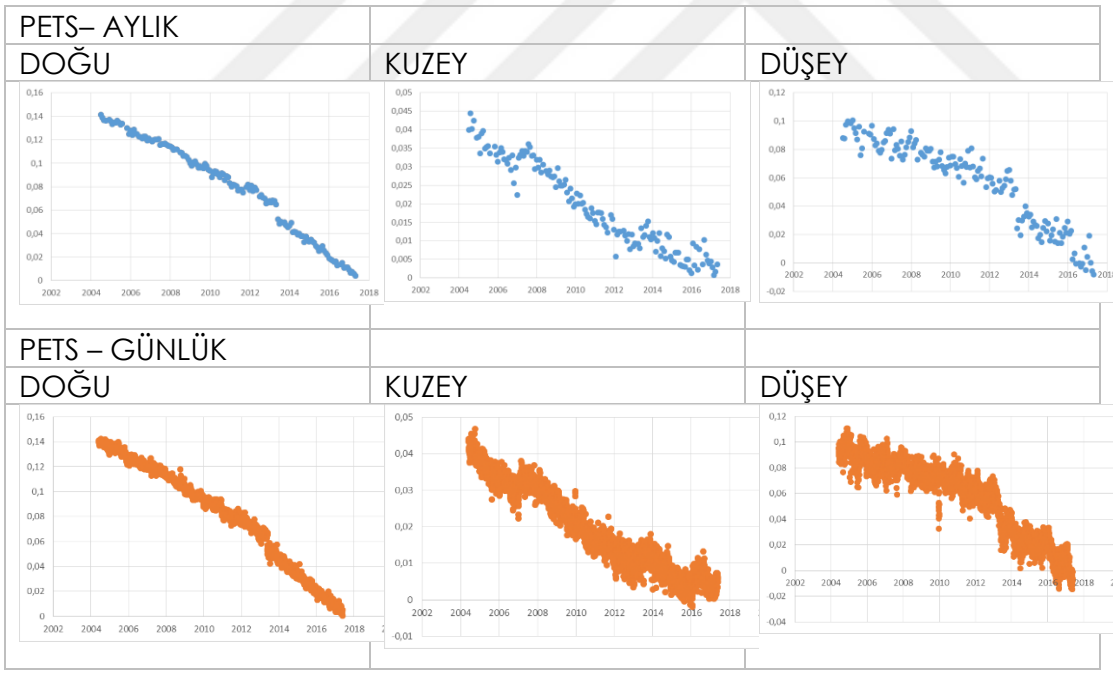
Şekil F.3: NYAL Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



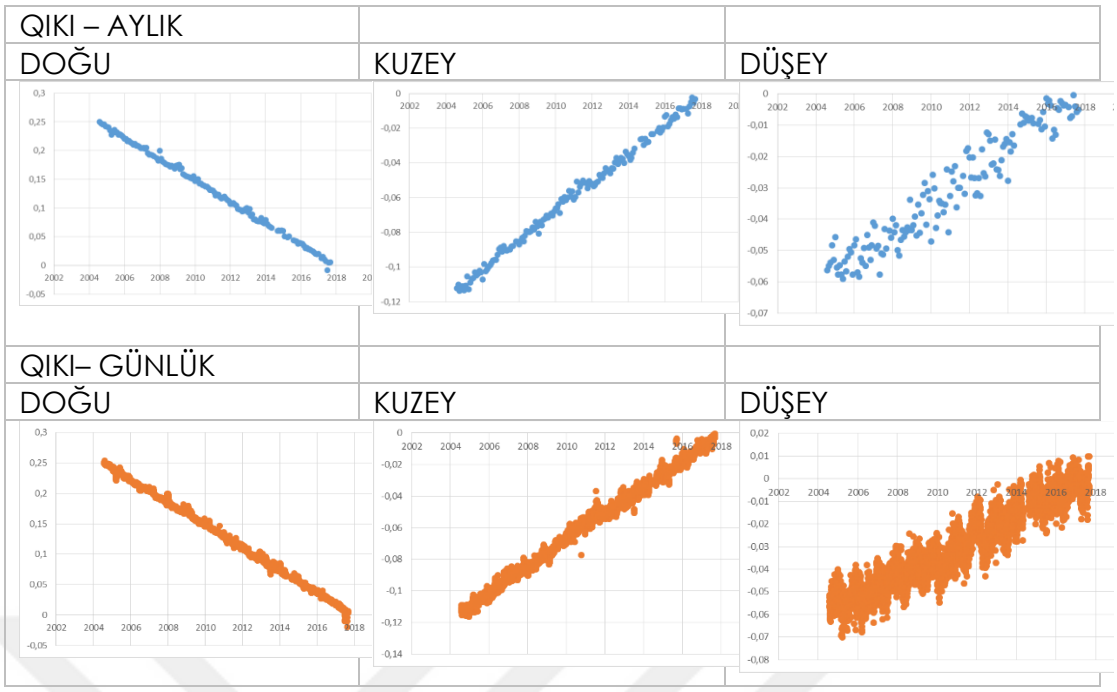
Şekil F.4: ONSA Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



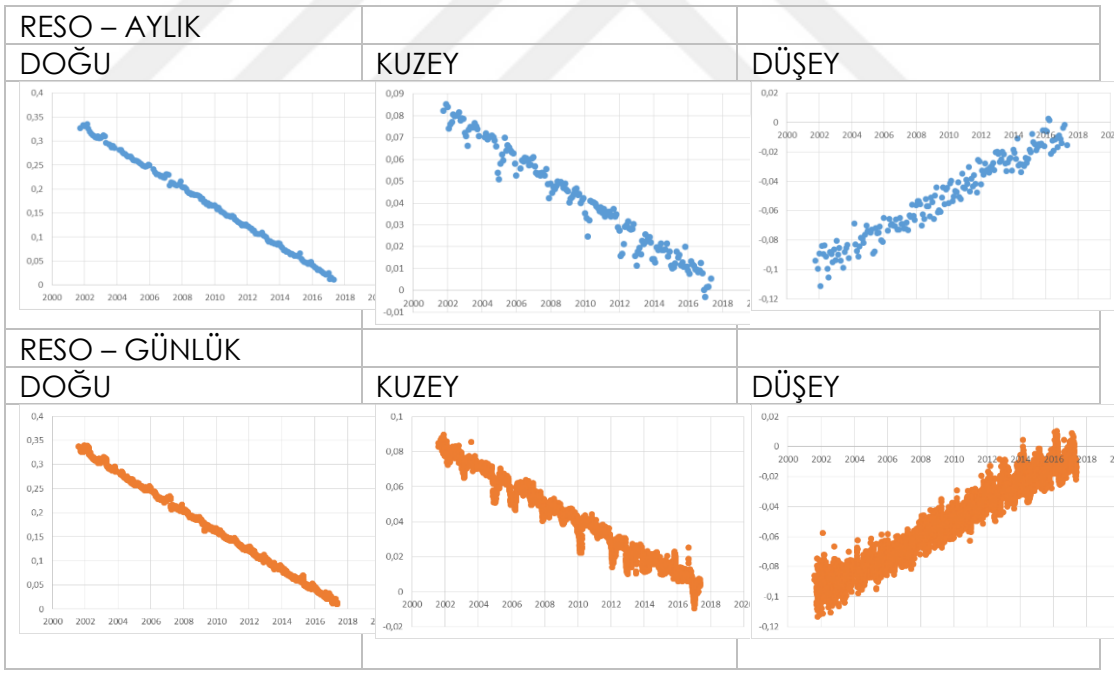
Şekil F.5: PALM Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



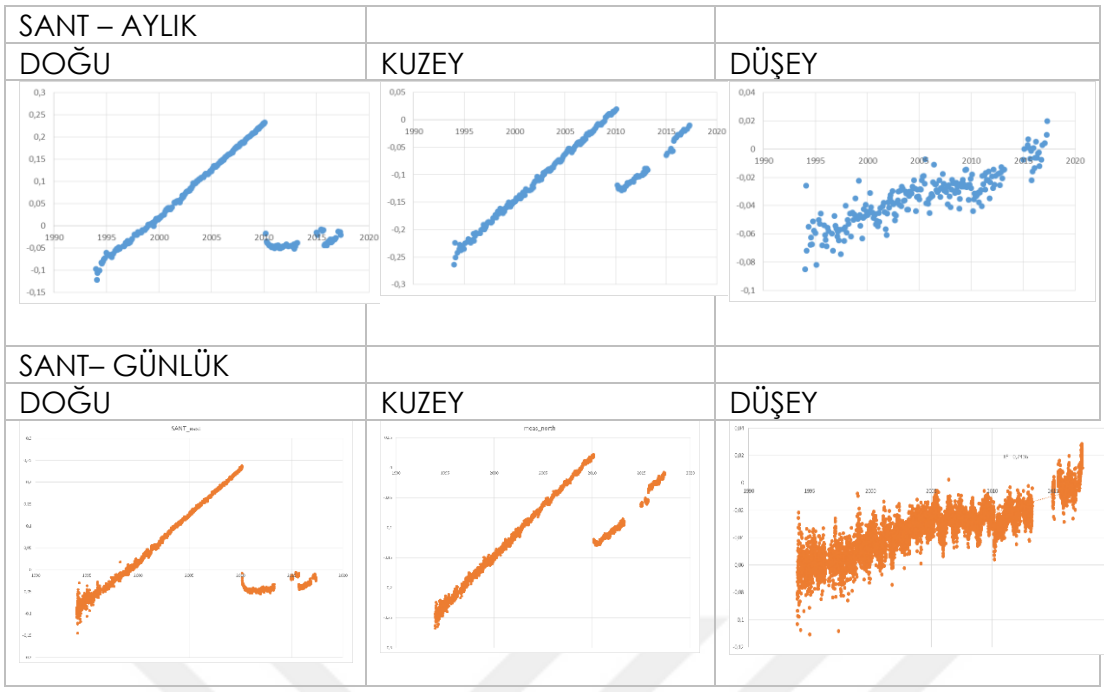
Şekil F.6: PETS Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



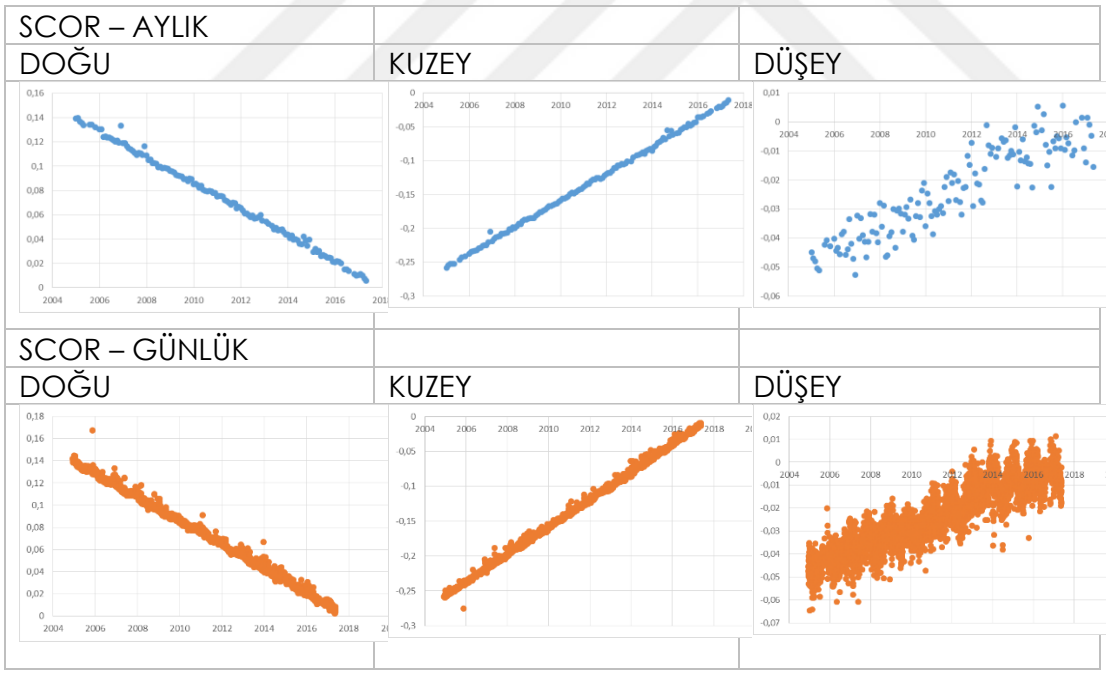
Şekil F.7: QIKI Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



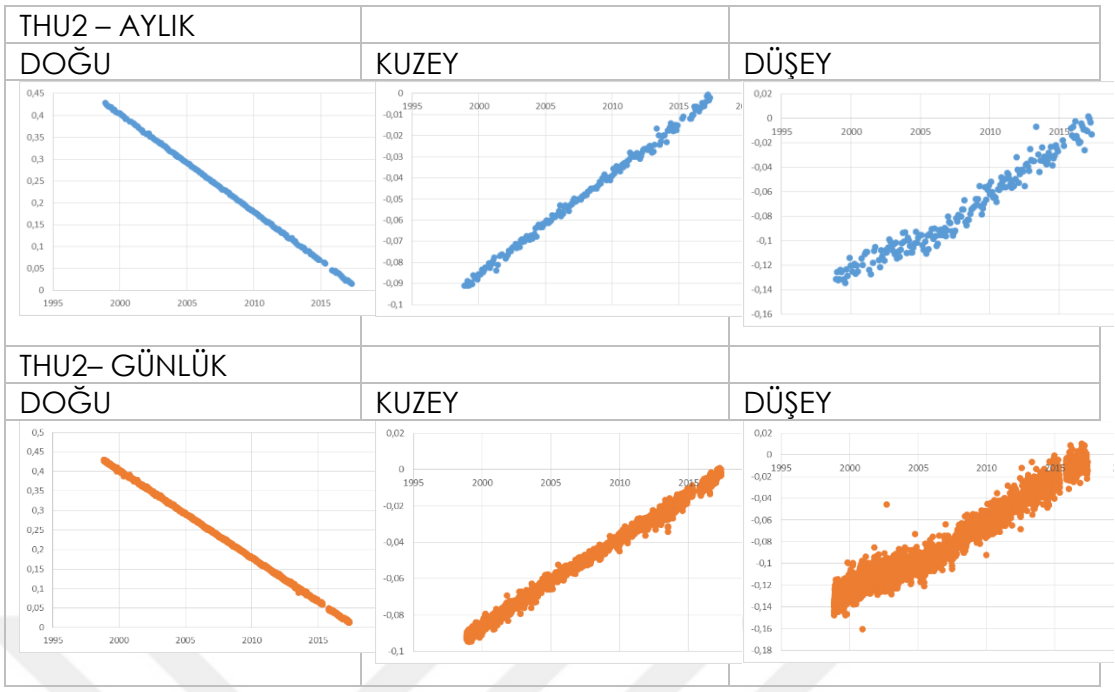
Şekil F.8: RESO Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



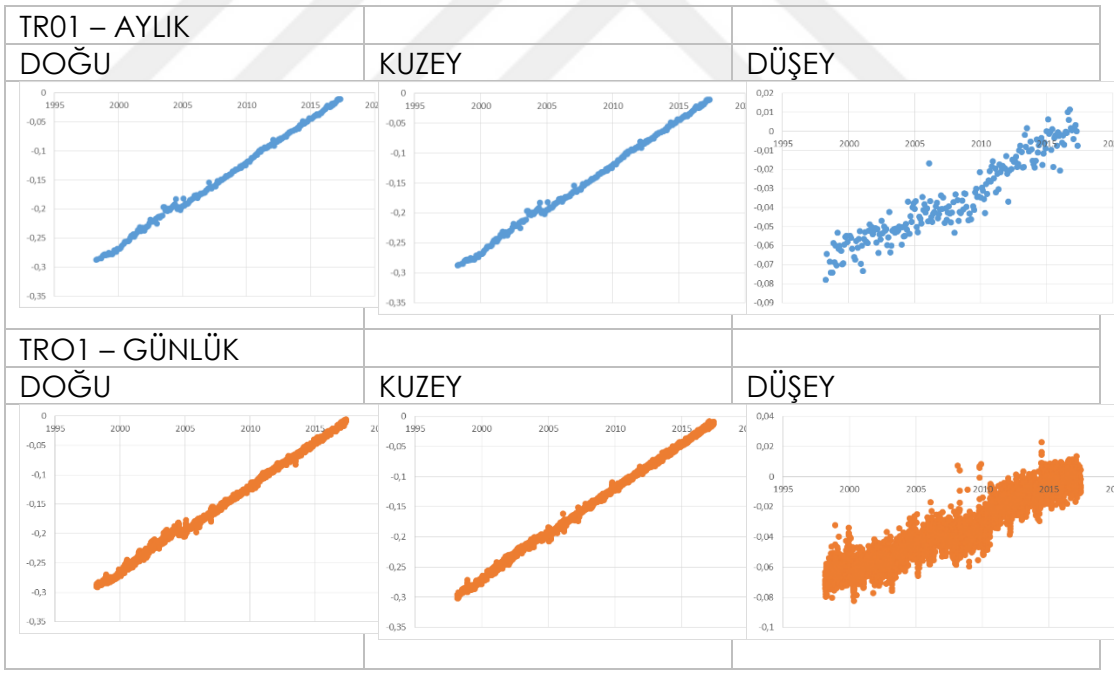
Şekil F.9: SANT Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



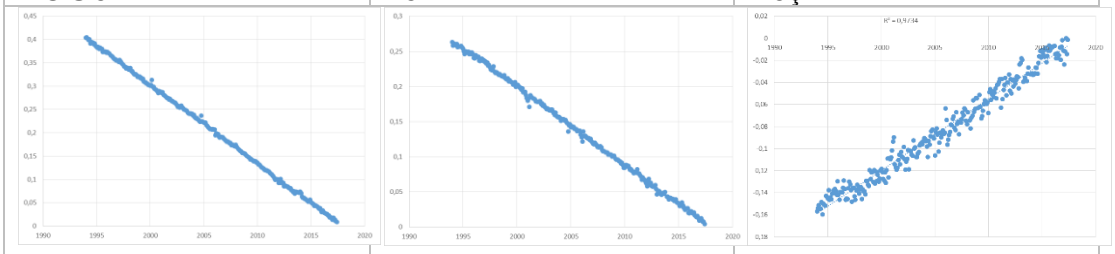
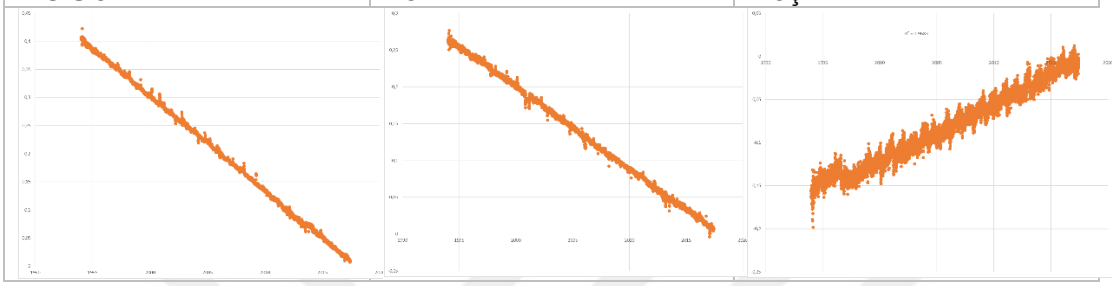
Şekil F.10: SCOR Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



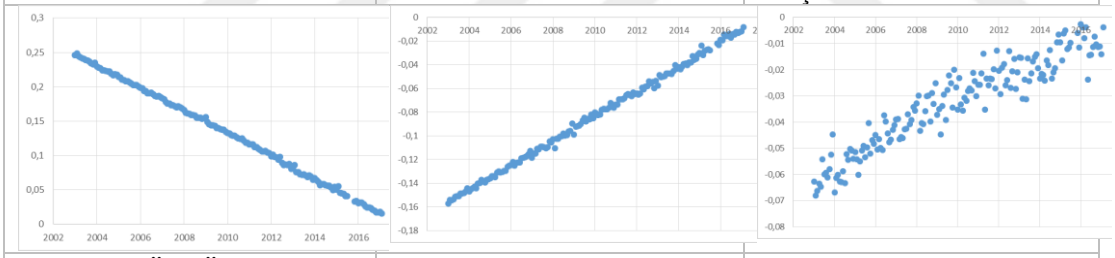
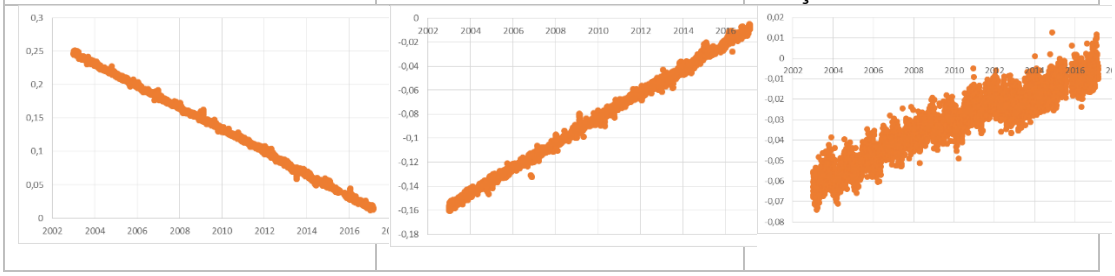
Şekil F.11: THU2 Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



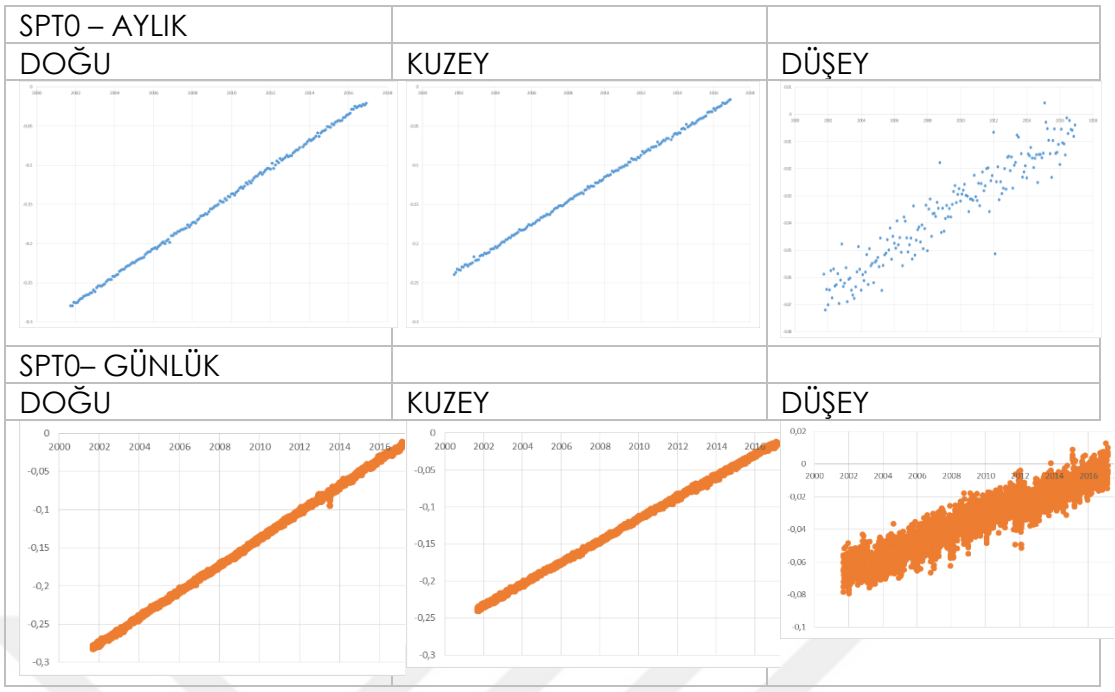
Şekil F.12: TR01 Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.

YELL – AYLIK		
DOĞU	KUZEY	DÜŞEY
		
YELL– GÜNLÜK		
DOĞU	KUZEY	DÜŞEY
		

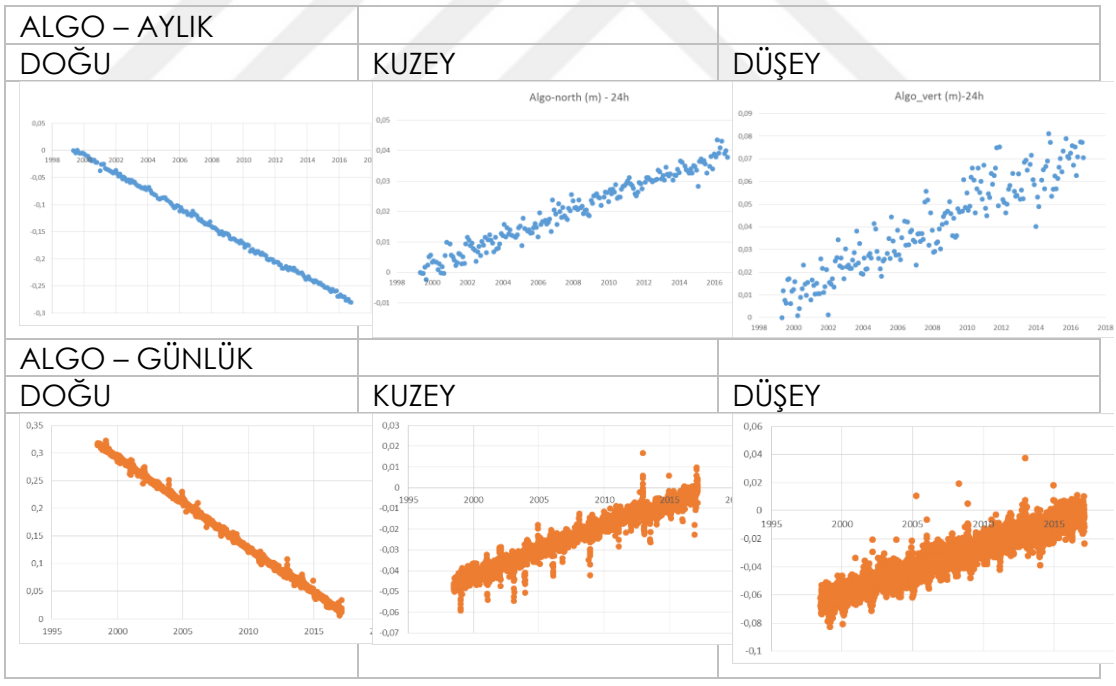
Şekil F.13: YELL Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.

NAIN – AYLIK		
DOĞU	KUZEY	DÜŞEY
		
NAIN – GÜNLÜK		
DOĞU	KUZEY	DÜŞEY
		

Şekil F.14: NAIN Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



Şekil F.15: SPT0 Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.



Şekil F.16: ALGO Noktası Günlük-Aylık Doğu(e), Kuzey(n), Düşey(v) Hız Değişimleri.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad **: Simge TEKİÇ RAHMANLAR**

Doğum Tarihi ve Yeri **: 09.10.1984 - Fatih**

E-posta **:** simge.tekic@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2006, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliğ Fakültesi, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** **:** 2009, Boğaziçi Üniversitesi, Kandilli Rasathanesi Deprem Araştırma Enstitüsü, Jeodezi Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 05/2008-02/2009 Emi harita Mühendislik firmasında harita mühendisi olarak görev almıştır.
- 07/2009-12/2010 Kültür ve Turizm Bakanlığı "İstanbul Kültür Başkenti" projesinde yüksek harita mühendisi olarak çalışmıştır.
- 04/2011-07/2012 Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Yüksek Hızlı Tren Bölge Müdürlüğü'nde saha kontrol mühendisi olarak görev almıştır.
- 07/2012 tarihinden itibaren Türkiye Cumhuriyeti Tarım ve Orman Bakanlığı'nda (eski adı Orman ve Su İşleri Bakanlığı) uzman olarak çalışmaktadır.
- 2019 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde doktorasını tamamlamıştır.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Rahmanlar, S. T.** 2019. Estimation of Glacial Rebound Effect by Vertical Velocity Analysis Method. *Türkiye Su Bilimleri ve Yönetimi Dergisi*, 3(1), 58-68.
- **Rahmanlar, S. T.**, Turen, Y., Sanli, D.U. ve Arslan E. 2018. Spectral Character of GNSS Campaign Measuremnets: Impressions from an Extended Global Network. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 20, EGU2018-3723-1, 2018 EGU General Assembly, Vienna.
- **Tekiç S.**, Şanlı D.U. ve Arslan E. 2017. Accuracy of GPS Velocities from Repeated GPS Surveys: Results From a Denser Network and Verification by Continuous GPS. *EGU General Assembly 2017* (Özet Bildiri) (Yayın No:4002376).
- **Tekiç S.**, Şanlı D. U. ve Arslan E. 2017. Yirmidört Saatlik Kampanya GPS Hız Kestirim Doğruluğu. TUJK 2017 Yılı Bilimsel Toplantısı Sabit GNSS İstasyonları Uygulamaları. İstanbul.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Rahmanlar, S.T.** 2016. Turkey's Water Approach for Sustainable Development Country of implementation Turkey Synopsis. *12th Kovacs Colloquium: Hydrological Inputs for Water-Related SDGs Implementation: Knowledge, Data, Indicators, Tools & Innovations*. UNESO, Paris.
- Rahmanlar M., Sahin U.A. ve **Rahmanlar, S. T.** 2016. A Modern Management Model Proposal for the Wastewater Treatment Plants in the Perspective of Public-Private Sector Cooperation. *International Symposium for Water and Wastewater Management*, October 26~28, 2016, Malatya, Turkey.
- **Rahmanlar, S. T.** 2015. Management of River Basins by Remote Sensing and GIS: Küçük Menderes basin. *Sustainable Watershed Management*, 2015 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-00018-6, 151-156.
- **Rahmanlar, S. T.** 2015. Entegre Havza Yönetiminde Karar Destek Sistemi Olarak Coğrafi Bilgi Sistemleri. (Uzmanlık Tezi, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara).
- Şanli D.U. ve **Tekiç S.** 2010. Accuracy of GPS Precise Point Positioning. *Lambert Academic Pub*, Saarbrücken, Germany.
- **Tekiç, S.** 2009. Accuracy of GPS Precise Point Positioning (PPP). (Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Universitesi, İstanbul).