

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

TEK FREKANSLI GPS ALICISI İLE
HASSAS KONUM BELİRLEME

Bilgin MUTLU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE

2011

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

TEK FREKANSLI GPS ALICISI İLE
HASSAS KONUM BELİRLEME

Bilgin MUTLU
YÜKSEK LİSANS TEZİ
JEODEZİ VE FOTOGRAMETRİ MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. M. Halis SAKA

GEBZE
2011



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 17/06/2011 tarih ve 2011/20 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 04/07/2011 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Bilgin MUTLU'un tez çalışması Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE (TEZ DANIŞMANI) : Doç.Dr. M.Halis SAKA

ÜYE : Prof.Dr. Taşkın KAVZOĞLU

ÜYE : Doç.Dr. Cengiz YATMAZ

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/07/2011 tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI : TEK FREKANSLI GPS ALICISI İLE HASSAS KONUM BELİRLEME

YAZAR ADI : BİLGİN MUTLU

GPS (Global Positioning System) uydu temelli konum belirleme sistemlerinin ilkidir. Esas amacı, yeryüzünde, gerçek zamanlı olarak objelerin konumlarının belli bir datuma bağlı olarak belirlenmesidir. Bu konudaki jeodezik çalışmalar, sistemin kuruluş aşamasından beri devam etmektedir. Güncel araştırmalar arasında ise, hızlı ve hassas konum belirlemeye yönelik çalışmalar önemli bir yer tutmaktadır.

Bu çalışmada tek frekanslı tek GPS alıcı kullanarak hassas konum belirlenme yöntemi (PPP) üzerine bir araştırma yapılmıştır. Çalışma Matlab yazılımında geliştirilen programlar yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Test verisi olarak, ISTA IGS noktasına ait veriler kullanılmıştır.

Çalışmanın amacı tek frekanslı tek GPS alıcısı kullanılarak hassas olarak pratik ve gerçek zamanlı sağlayacağı konum doğruluğun irdelenmesidir. Çalışmada hassas konum belirlemenin birincil etkileri dikkate alınmıştır. Bunlar, hassas uydu yörünge ve saat bilgilerinin kullanımını, standart atmosferik modellerle birlikte, uydu anten faz merkezi kayıklıkların ve kara yükselmelerini içermektedir. Verilerin değerlendirilmesinde, GPS L1 frekansı kod ölçüleri ve faz yumuşatması (phase smoothing) tekniği kullanılmak suretiyle de faz ölçüleri kullanılmıştır.

Sonuç olarak, metre altı bir doğruluk elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, noktanın gerçek koordinatlarıyla karşılaştırıldığında özellikle faz değerlerinin kullanımında farkların birkaç desimetreyi geçmediği gözlenmiştir.

SUMMARY

**TITLE OF THESIS : PRECISE POINT POSITIONING WITH SINGLE
FREQUENCY GPS RECEIVER**

AUTHOR : BİLGİN MUTLU

GPS (Global Positioning System) is the first of the satellite based point positioning systems. Its main objective is to position the real-time locations of the objects on the earth related to a datum. The geodesic studies on this scope have been continuing since the establishment of the system. The studies on fast and precise location positioning take an important place amongst the current research.

In this study, the precise point positioning (PPP) has been researched with a single frequency single GPS receiver. The study has been done by means of the programs developed by the Matlab software. The data of ISTA IGS point have been used as the test data.

The objective of this study is to examine the correctness of the point which will be precisely and practically found in real-time with the single frequency single GPS receiver. The primary effects of the precise point positioning have been considered in this study. The aforesaid effects consist of the use of precise satellite orbit and clock information, satellite antenna phase center skewnesses with standard atmospheric models, and land ascensions. In the evaluations of the data, GPS L1 frequency code measurements and phase measurements with the phase smoothing technique have been used.

In conclusion, a correctness under a meter has been obtained. When the obtained results were compared to the real coordinates of the point, it was seen that the differences in the use of phase values were not above a few decimeters.

TEŞEKKÜR

Tez konusunun belirlenmesinde ve tez çalışmasının hazırlanmasında tüm aşamalarda bana yardımcı olan sayın Doç. Dr. Mehmet Halis SAKA başta olmak üzere ve GYTE' ye her gidişimde rahat çalışma ortamı sağlayan Bölüm Başkanı Prof. Dr. Taşkın KAVZOĞLU öncülüğündeki GYTE Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü çalışanları ile benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Gebze, 2011

Bilgin MUTLU

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. GPS İLE HASSAS KONUM BELİRLEME	4
2.1 Kod Gözlemi (Code Pseudorange) ve Uydu – Alıcı Uzaklığının Ölçümü	5
2.2 Faz Gözlemi (Phase Pseudorange) ve Uydu Alıcı Uzaklığının Hesabı	6
2.3 Kod Gözlemi Düzeltmesi (Code Pseudorange Smoothing)	8
2.4 Hassas Konum Belirleme	10
3. HASSAS KONUM BELİRLEMENİN BİLEŞENLERİ	12
3.1 Uydu Efemeris Hataları	12
3.2 Uydu Saati Hataları	13
3.3 İyonosfer Etkisi	14
3.4 Troposfer Etkisi	18
3.5 Sinyal Yansıma (Multipath) Etkisi	21
3.6 Alıcı Anteni Faz Merkezi Hatası	21
3.7 Uydu Anteni Faz Merkezi Hatası	22
3.8 Uydu Faz Dönmesi (Phase Wind Up)	23
3.9 Yer Yuvarı Dönme Parametreleri (ERP: Earth Rotation Parameters)	24
3.10 Kutup Gezinmesi/Kutup Gelgiti (Polar Motion/Polar Tides)	25

3.11 Okyanus Yükleme (Ocean Loading)	26
3.12 Katı Yeryuvarı Gelgiti (Solid Earth Tides)	26
3.13 İstasyon Hızları/Konum Değişimleri (Site Displacement Effects)	27
4. UYGULAMA	29
4.1 Çalışma Alanı ve Veriler	29
4.2 Verilerin ve Düzeltme Değerlerinin Programa Eklenmesi	31
4.3 Analiz Sonuçları	35
5. SONUÇLAR	49
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	55

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

c	:Işık Hızı
Δ	:Değişim Miktarı
α_i, β_i	:İyonosferik Model Katsayıları
φ_i, λ_i	:Jeodezik Enlem ve Boylam Değerleri
ρ	:Uydu ve Alıcı Arasındaki Geometrik Uzaklık (Pseudorange)
$\varphi(t)$	:Uydu ve Alıcı Arasındaki Faz Gözlemi
δ	:Troposferik Gecikme Miktarı
z	:Zenit Açısını
N	:Faz Başlangıç Bilinmeyeni
R_h	:Nem Değeri
T	:Kelvin Biriminde İstasyon Sıcaklığını
P	:Milibar Biriminde Atmosferik Basıncı
e	:Kısmi Su Basıncı
R	:Kod Ölçüsü
w	:Ağırlık Katsayısı
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AS	: Anti Spoofing
C/A	:Course/Acquisition, Clear Access
CORS	:Continuously Operating Reference Station (in USA)
ERP	:Earth Rotation Parameters (Yer Yuvarı Dönme Parametreleri)
ECEF	:Earth-Centered, Earth-Fixed
GLONASS	:GLObal NAvigation Satellite System
GNSS	:Global Navigation Satellite Systems
GPS	:Global Positioning System
ICRS	:International Celestial Reference System
ICRF	:International Celestial Reference Frame
IERS	:International Earth Rotation Service
IGS	:International GNSS Service
ITRS	:International Celestial Reference System

ITRF	:International Celestial Reference Frame
MATLAB	:MATrix LABoratory
NASA/JPL	:The National Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory
NAVSTAR	:Navigation Satellite Timing And Ranging
NAP	:Nuclear Detection System Analysis Package
NGS	:National Geodetic Survey
NOAA	:National Oceanic and Atmospheric Administration
NSD	:Nuclear Detection System
OCS	:Operational Control System
P	:Precise/Protected Code
PPP	:Precise Point Positioning
PRN	:Pseudo Random Noise
RTK	:Real Time Kinematic
SA	:Selective Availability (Seçimli Doğruluk)
SOPAC	:Scripps Orbit and Permanent Array Center
SP3	:Standart Product 3
TEC	:Total Electron Content
UT	:Universal Time

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Taşıyıcı Dalga Faz Başlangıç Belirsizliği	8
3.1. GPS Etki Eden Hata Kaynakları	12
3.2. Uydu Anteni Faz Merkezi Kayıklıkları	22
4.1. Katı Yer Yuvarı Etkisi Sonuç Değerleri	30
4.2. Sabit Değerlerin Programa Tanıtılması	31
4.3. IGS Saat Düzeltmesi Hesaplanmamış Uyduların Tespiti	33
4.4. Uydu Anteni Faz Merkezi Hatası Düzeltmesi	33
4.5. Katı Yer Yuvarı Etkisinin Hesaplanan Alıcı Koordinatlarına Eklenmesi	35
4.6. Tek Frekanslı Çözüm Sonucu (01 Şubat 2011)	36
4.7. Çift Frekanslı Çözüm Sonucu (01 Şubat 2011)	36
4.8. Tek Frekans Kullanılarak ile Elde Edilen Sonuçlar	37
4.9. Çift Frekans Kullanılarak ile Elde Edilen Sonuçlar	37
4.10. Kod Düzeltmesi İşlemi Sonucu Elde Edilen Analiz Sonucu (01 Şubat 2011)	38
4.11. Kod Düzeltmesi İşlemi Sonucu Elde Edilen Detaylı Analiz Sonucu	39
4.12. 01 Şubat 2011 Tarihli Sonuçların Karşılaştırılması	40
4.13. 17 Mart 2011 Tarihli Verinin Tek Frekans Kullanılarak Çözümü	41
4.14. 17 Mart 2011 Tarihli Verinin Çift Frekans Kullanılarak Çözümü	42
4.15. 17 Mart 2011 Tarihli Verinin Kod Düzeltmesi Getirilerek Elde Edilen Çözümü	42
4.16. 17 Mart 2011 Tarihli Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması	44
4.17. 30 Nisan 2011 Tarihli Verinin Tek Frekans Kullanılarak Elde Edilen Çözümü	45
4.18. 30 Nisan 2011 Tarihli Verinin Çift Frekans Kullanılarak Çözümü	45
4.19. 30 Nisan 2011 Tarihli Verinin Kod Düzeltmesi Uygulanarak Çözümü	46
4.20. 30 Nisan 2011 Tarihli Verilerin Çözüm Sonuçlarının Karşılaştırılması	47

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Rinex Navigasyon Mesajı İçinde ki İyonosfer Model Katsayıları	15
3.2. B'nin yüksekliğe (H) bağlı fonksiyon değerleri	20
3.3. δR 'nin yükseklik (H) ve zenit açısına (z) bağlı fonksiyon değerleri	20
3.4. GPS Uydu Anteni Faz Merkezi Kayıklığı	23
3.5. Hassas Konum Belirlemede Dikkat Edilmesi Gereken Hata Kaynaklarının Ölçü Noktasında Etki Büyüklükleri	28
4.1. Katı Yer Yuvarı Etkisi Sonuç Değerlerinin GPS Zamanına Göre Düzenlenmesi	31
4.2. Rinex Navigasyon Mesajında Bulunan İyonosfer Modellemesi İçin Kullanılan Parametreler	34
4.3. Tek Frekanslı Çözüm İle Elde Edilen Sayısal Değerler	40
4.4. Çift Frekanslı Çözüm İle Elde Edilen Sayısal Sonuçlar	40
4.5. Kod Düzeltmesi Getirilerek Elde Edilen Sonuçlar	41
4.6. 17 Mart 2011 Tarihli Verinden Tek Frekans Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar	43
4.7. 17 Mart 2011 Tarihli Verinden Çift Frekans Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar	43
4.8. 17 Mart 2011 Tarihli Verinden Kod Düzeltmesi Getirilerek Elde Edilen Sonuçlar	43
4.9. 30 Nisan 2011 Tarihli Verinin Tek Frekans İle Elde Edilen Çözüm Sonuçları	46
4.10. 30 Nisan 2011 Tarihli Verinin Çift Frekans İle Elde Edilen Çözüm Sonuçları	47
4.11. 30 Nisan 2011 Tarihli Verinin Kod Düzeltmesi Uygulanarak Elde Edilen Çözüm Sonuçları	47

1. GİRİŞ

GPS de, sistemin kullanılmaya başlandığı 80’li yıllardan itibaren, hassas konum belirlemeye yönelik çalışmalar büyük bir hızla devam etmektedir. Hassas konum belirlemenin temelini, rölatif konum belirleme yöntemleri oluşturmaktadır. Özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılabilecek dar ve geniş alanlı olmak üzere, diferansiyel GPS yöntemi oldukça gelişmiştir. Bunlara ilave olarak CORS gibi mühendislik amaçlı gerçek zamanlı çözümler sağlayan ağlarda kurulmuştur. Gerçek zamanlı olmayan çalışmalarda ise, hassas uydu saat ve yörünge bilgilerinin kullanılabilirliği sayesinde; Hassas Konum Belirleme Yöntemi (PPP), tek bir cihazla, herhangi bir DGPS ağından bağımsız santimetre-desimetre doğruluğunda sonuçlar sağlamaktadır.

Hassas Konum Belirleme üzerine ilk araştırmalar NASA JPL (The National Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory) tarafından gerçekleştirilmiştir (Witchayangkoon, 2000). Bu yöntemde kod ve/veya taşıyıcı faz ölçüleri kullanılarak tek bir alıcı ile cm mertebesine varan konum doğrulukları elde etmek mümkün olmuştur. Yöntemden elde edilebilecek konum doğruluk değerleri kullanılan veriye (kod/faz, tek frekans/çift frekans) göre cm ile metre arasında değişmektedir (Kouba and Heroux 2001; Kouba 2003; Kouba 2009).

Hassas konum belirleme (Precise Point Positioning) çalışmalarında bu doğrulukları elde edebilmek için, iyonosferik ve troposferik etkiler, efemeris hataları, sinyal yansıma etkisi, uydu ve alıcı saat hataları, uydu konum doğrulukları, okyanus etkisi, katı yeryuvarı etkisi ve faz başlangıç belirsizlikleri gibi etkiler dikkate alınmalıdır. Yukarıda belirtilen etkilerden, uydu saat hataları ve efemeris hatalarının elemine edilebilmesi için Uluslararası GNSS (Global Navigation Satellite Systems) servisi (IGS: International GNSS Service) tarafından üretilen hassas efemeris ürünlerinin kullanılması oldukça önemlidir (Hofmann et al., 2007; Witchayangkoon, 2000).

Hassas konum belirleme (PPP) üzerine gerçekleştirilen ilk çalışma Zumberge ve arkadaşları tarafından 1997 yılında yapılan “Büyük Ölçekli bir GPS ağına IGS

ürünlerinin konum belirleme doğruluğuna etkisi” konulu araştırmadır. Çalışma ABD’de kullanılan ve kontrolü NGS’de (National Geodetic Survey) olan CORS (Continuously Operating Reference Station in USA) ağında bir uygulama ile gerçekleştirildi. Hesaplamalarında hassas efemeris ve saat verileri ile birlikte katı yer yuvarı etkileri de dikkate alındı. Günlük veri setleri halinde taşıyıcı faz ölçülerini kullanarak gerçekleştirilen analiz çalışmaları sonucu ise konum doğruluğu santimetre mertebesinde elde edildi (Witchayangkoon, 2000).

Başka bir çalışmalarında ise IGS tarafından kurulmuş alt bir ağ olan Flinn küresel ağında (Flinn Global Network) efemeris ve saat bilgilerinin çözümü üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışmanın gerçekleştirildiği Flinn ağında rabidyum veya sezyum saatleri kullanılan GPS alıcıları mevcuttur. Bu alıcılardan elde edilen konum doğruluğu 2 cm olmuştur. Bu çalışma da saat verilerinin elde edilecek konum doğrulukları üzerine etkisi araştırılmıştır (Zumberge et al., 1997). En az 5 dakikalık veriler kullanarak hassas GPS alıcılarının bulunduğu bu ağda gerçekleştirilen çalışma “Flinn Solution” olarak isimlendirilmektedir (Witchayangkoon, 2000).

Witchayangkoon, 2000 deki çalışmada, tek ve çift frekanslı alıcılar kullanarak Hassas Konum Belirleme de statik ve kinematik ölçü yöntemi ile elde ettiği verilerin analizini yapılmıştır. Statik ölçü yöntemi kullanarak gerçekleştirdiği çalışmada 4 istasyondan elde ettiği 6 saatlik veri setlerini kullandı. Çalışmada ayrıca alıcı saat hataları ve belirsizliklerin konum doğruluğuna etkisi incelendi. Elde edilen tüm sonuçlar katı yeryuvarı etkisi ve uydu faz merkezi hataları dikkate alınarak elde edildi. Elde ettiği sonuçları JPL tarafından geliştirilen internet uygulamasından elde ettiği sonuçlar ile de karşılaştırdı. Çalışmada çift frekanslı alıcılar kullanılarak elde edilen konum doğruluğu 9,3 cm dir. Bu çalışma düşük sinyal yansıma etkisi olduğu ve iyonosferden bağımsız tek frekanslı çözümler ile de çift frekanslı çözümler kullanılarak elde edilen sonuçlar ile benzer sonuçların elde edilebileceğini göstermiştir. Kinematik ölçü yöntemi ile tek frekanslı alıcılar kullanarak elde edilen konum doğrulukları ise 1m civarındadır. Ayrıca istasyon koordinatlarının hassas olarak belirlenmesinde uydu ve alıcı saat hatalarının, atmosfer ve troposfer etkisinin, belirsizliklerin, yer yuvarı hareketlerinin, ay ve güneşin çekim etkilerinin hem statik hem de kinematik ölçü yöntemi ile yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlara etkisi incelenmiştir.

Diğer bir uygulamada (Gao, 2006), statikve kinematik ölçü yöntemleri ile gözlem yapılması ve her iki gözlem yöntemiyle de gerçekleştirilen ölçümler sonucunda Hassas Konum Belirleme (PPP) yönteminin diferansiyel konum belirleme yöntemine göre bazı durumlarda göreceli olarak daha doğru sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Ancak hassas konum belirleme çalışmalarında DGPS yöntemine göre daha karmaşık hesaplamaların olduğu ve okyanus etkisi, katı yer yuvarı etkisi, faz merkezi hataları gibi hataların mutlaka dikkate alınması gerektiği açıktır.

Bu tez çalışmasında ise tek GPS alıcısı ile hassas konum belirleme üzerine birincil dereceden etkiler esas alınarak, navigasyon çözümü temelli bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yöntem (PPP: Precise Point Positioning) için Matlab Programlama dilinde yazılmış olan Easy 3 isimli programa belli sistematik hata kaynaklarını elemine edebilmek için eklemeler yapıldı. Uydu ve Alıcı saat hatalarını, katı yeryuvarı etkilerini, uydu ve alıcı anteni faz merkezi hatalarını ve de GPS sinyallerine etkisi olan iyonosfer ve troposferin etkilerini elemine edebilmek için alt programlar geliştirildi. Uydu koordinatlarının ve saat hatalarının düzeltilebilmesi için Hassas Efemeris (*.sp3) verilerinden yararlanıldı. Çalışmada test verisi olarak, ISTA isimli IGS istasyonunda kayıt edilen veriler kullanılmıştır.

Tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm giriş bölümü olup hassas konum belirleme ile ilgili yapılmış çalışmalardan kısaca bahsedilmiştir. İkinci bölüm de, GPS ile konum belirleme de kullanılan ölçü yöntemleri ve hassas konum belirleyebilmek için bu ölçü değerlerine getirilmesi gereken düzeltmelerden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde hassas konum belirlemede konum doğruluğunu etkileyebilecek hata kaynakları açıklanmıştır. Dördüncü bölüm ise yapılan uygulamayı içermektedir. Beşinci bölüm de elde edilen sonuçlar ve ileride yapılacak çalışmalara altlık olması amacıyla önerilere değinilmiştir.

2. GPS İLE HASSAS KONUM BELİRLEME

GPS (Global Positioning System) Amerika Birleşik Devletleri Savunma Bakanlığı tarafından kurulmuş olan ve kontrol edilen, sürekli olarak konum ve zaman bilgisi elde etmeye yarayan bir uydu navigasyon sistemidir. Uydular yardımıyla konum bilgisi elde etmek için geliştirilen bu sistem, 1978 yılında ilk uydunun yörüngeye oturtulması ile başlamıştır. 1993 yılında 24 uydunun yerleştirilmesi ile birlikte sistem tamamlanmıştır (Witchayangkoon, 2000). GPS sistemi günümüzde aktif 32 uydu ile çalışmaya devam etmektedir.

GPS uyduları yeryüzünden yaklaşık olarak 20200 km uzaklıkta ve yörüngeleri ekvator düzlemi ile 55° lik açı yapmaktadırlar. İlk uydunun gönderildiği 1978 yılından itibaren, 4 farklı türde GPS uydusu yörüngeye oturtulmuştur. Bunlar; Block I, Block II/IIA ve Block IIR model uydulardır (Hofmann et al., 2007). Mayıs 2010 tarihinden itibaren de Block IIF uyduları kullanılmaya başlanmıştır (Block II Satellite Information, 2011).

Her bir GPS uydusu L_1 ve L_2 olarak isimlendirilen iki temel taşıyıcı frekansa sahiptir. Bu taşıyıcı frekansların özellikleri; $L_1 = 10.23 \times 154 = 1575.42$ MHz (dalga boyu $\lambda \approx 19.0$ cm) ve $L_2 = 10.23 \times 120 = 1227.6$ MHz (dalga boyu $\lambda \approx 24.4$ cm)' dir (Witchayangkoon, 2000; Hofmann et al., 2007).

L_1 ve L_2 taşıyıcı frekansları üzerine P kodu modüle edilmiştir. L_1 sinyali üzerinde L_2 'den farklı olarak C/A kodu ile birlikte 50 bit/sn'lik veri hızında GPS navigasyon mesajı verileri de bulunmaktadır. 2010 yılından itibaren kullanılmaya başlanan yeni nesil uydularda, yeni bir sivil frekans tahsisi de söz konusudur. Bu yeni frekans, yeni nesil Block IIF uyduları üzerinden yayınlanmaya başlanmış olup bu sinyale L_5 adı verilmiştir (Block II Satellite Information, 2011). L_5 sinyalinin frekansı 1176.45 MHz'dir. Yeni sinyal daha iyi korelasyon özellikleri, daha güçlü sinyal, geliştirilmiş mesaj yapısı, yüksek doğruluk ve gelişmiş parazit koruma sağlayacaktır. L_5 sinyalinin asıl olarak hava araçlarının güvenli navigasyonu amacıyla kullanılması planlanmakla birlikte, büyük bir olasılıkla askeri ve sivil tüm kullanıcılara açık olacaktır (Hofmann et al., 2007).

2.1 Kod Gözlemi (Code Pseudorange) ve Uydu – Alıcı Uzaklığının Ölçümü

Kod ölçüsü, uydudan yayınlanan sinyalin uydudan çıkış anı ile alıcıya ulaştığı ana kadar geçen zamanın, “c” ışık hızı ile çarpılması ile elde edilen uydu alıcı uzaklığıdır. Sinyalin uyduyu terk ettiği andan itibaren alıcıya ulaşana kadar geçen zaman ise alıcı ve uydu tarafından üretilen PRN kodlarının karşılaştırılması ile bulunur. Aşağıda açıklanacak olan bozucu etkiler ihmal edilirse uydu ve alıcı arasındaki ön uzunluk

$$\rho_r^s(t) = c.(t_r - t^s) \quad (2.1)$$

olacaktır. (2.1) eşitliğinde uydu ve alıcı saatlerinin belirli bir zaman sistemine göre kayıklıkları olacağından ölçülen değer (görünen) pseudo uzunluk olarak isimlendirilmektedir (Koçak, 2004). Bu uzunluk uydu ve alıcı saat senkronizasyonu tam sağlanamadığından dolayı saat hatalarını da içermektedir. Pseudorange C/A ve P kodlarının her ikisi kullanılarak belirlenebilmektedir (El-Rabbany, 2002).

Uydu saat hataları navigasyon mesajı ile birlikte alıcılara yayınlanmaktadır. Bunun yanı sıra, uydu saat hatası düzeltmeleri IGS tarafından yayınlanan hassas (precise) yörünge bilgileriyle beraberde yayınlanmaktadır. Bu nedenle uydu saat hataları ölçüye getirilen düzeltme yardımıyla giderilebilmektedir. Oysa alıcı saatleri için durum farklı olup bunların anlık hataları belirsizdir. Bu nedenle ölçülen uzunluk alıcı saat hatasını bilinmeyen olarak içermektedir. Tüm bunlar dikkate alındığında, kod ölçüleri için

$$R_r^s(t) = \rho_r^s(t) + c\Delta\delta_r^s \quad \text{eşitliği elde edilir.} \quad (2.2)$$

(2.2) eşitliğinde R kod ölçüsünü, yani sinyalin uydudan çıkıp alıcıya gelene kadar geçirdiği sürenin “c” ışık hızı ile çarpımı ile elde edilen ön uzunluğu, ρ alıcı ile uydu arasındaki geometrik uzunluğu, $\Delta\delta$ ise t ölçme anındaki; alıcı saat hatasını ifade etmektedir. Ayrıca uydu ve alıcı arasındaki mesafe ölçümlerine iyonosfer ve troposferin etkileri de mevcuttur. Bu etkilerin giderilmesi ile ilgili detaylı bilgiler

Bölüm 3 de verilmiştir. Tüm bu etkilerin dikkate alınması ile alıcı ve uydu arasındaki geometrik uzunluk

$$R_r^s(t) = \rho_r^s(t) + c\Delta\delta_r + I_r^s + T_r^s \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilir.

Uydu ve alıcı arasındaki geometrik uzunluk olan “ ρ ” uydu ve alıcı koordinatlarının fonksiyonu olarak ifade edilirse (2.3) eşitliğindeki geometrik uzunluk terimi,

$$\rho_r^s(t) = \left[\sqrt{(X^s(t) - X_r)^2 + (Y^s(t) - Y_r)^2 + (Z^s(t) - Z_r)^2} \right] \quad (2.4)$$

şeklinde gösterilir.

$$R_r^s(t) = \left[\sqrt{(X^s(t) - X_r)^2 + (Y^s(t) - Y_r)^2 + (Z^s(t) - Z_r)^2} \right] + c\Delta t_r \quad (2.5)$$

Sonuç olarak (2.5) eşitliği elde edilir. Denklemdaki dört bilinmeyeni çözmek için en az dört uyduya gözlem yapılmalıdır. (2.5) eşitliği lineer olmayıp çözümünü için Taylor dizisine açılıp ikinci ve daha üst dereceden terimler göz ardı edilerek denklem lineerleştirilir (Kahveci ve Yıldız, 2009). (2.5) eşitliğinde uydu koordinatları t anı için bilindiğine göre alıcı koordinatları ECEF koordinat sisteminde hesaplanabilir (Hofmannand vd., 2007). Böylece kod gözlemi yardımı ile alıcı koordinatlarının hesabı gerçekleştirilmiş olur.

2.2 Faz Gözlemi (Phase Pseudorange) ve Uydu Alıcı Uzaklığının Hesabı

Uydu – Alıcı uzaklığının hesaplanmasında kullanılan diğer bir yöntem ise faz gözlemidir. Faz gözlemi t^s zamanında uydudan yayınlanan sinyalin taşıyıcı fazı ile t_r zamanında alıcı tarafından üretilen referans sinyalin fazı arasındaki farktır (El-

Rabbany, 2002; Kahveci ve Yıldız, 2009). Faz farkı ölçü duyarlılığı kod ölçü duyarlılığından daha yüksektir. Bunun nedeni de faz taşıyıcı dalga boylarının kod taşıyıcı dalga boylarından daha küçük olmasıdır (El-Rabbany, 2002).

Faz ölçüsü gözlemlerinde tek bir sorun vardır, o da alıcı açıldığı ilk anda alıcıya ulaşan sinyal döngülerinin sayısı tam olarak hesaplanamamaktadır. Buna tam sayı faz belirsizliği (Ambiguity) adı verilmiştir (El-Rabbany, 2002).

Atmosferik etkiler, relativistik etkiler, alıcı saati hatası ve diğer bozucu etkiler dikkate alınmazsa anlık faz farkı,

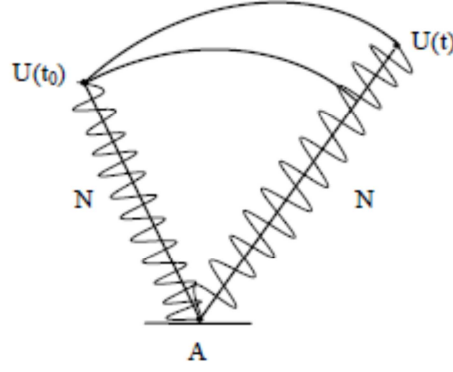
$$\Phi_r(t_r) = \Phi^s(t^s) - \Phi_r(t_r) \quad (2.6)$$

eşitliği ile ifade edilir. Burada $\Phi^s(t^s)$, t^s uydu saati zamanında yayınlanan sinyal fazını, $\Phi_r(t_r)$ ise alıcının uydu sinyalini aldığı t_r zamanında alıcıda üretilen fazı göstermektedir.

Taşıyıcı dalga faz gözlemleri, alıcı alet herhangi bir t_0 anında açıldığında uydu ile alıcı arasında uzaklığın karşılığı olan fazın sadece kesirli kısmını ölçebilir; devirli tam sayısına karşılık gelen ve tam sayı faz belirsizliği (N) olarak adlandırılan kısım belirlenemez. Ancak, alıcı kapatılmadan t anına kadar gelen sinyal sürekli olarak izlenerek, t_0 ölçü başlangıç anından itibaren geçen süre Δt süresince alınan sinyalin fazı (alıcı içerisinde sayılan tam devir faz ve ölçülen kesirli kısmın toplamı) ölçülür.

$$\Phi(t) = \Phi^s(t) - \Phi_r(t) + N(1) + \text{SinyalGürültüsü(noise)} \quad (2.7)$$

elde edilir. Burada, $\Phi(t)$ uydu ve alıcı için dalga boyu (cycle) biriminde faz gözlemi, $\Phi^s(t)$ alıcı tarafından t zamanında (GPS zamanı) kaydedilen sinyal fazını, $\Phi_r(t)$ t zamanında alıcıda üretilen sinyal fazını, $N(1)$ faz başlangıç bilinmeyenini ifade etmektedir.



Şekil 2.1. Taşıyıcı Dalga Faz Başlangıç Belirsizliği

$\rho = c\Delta t$ eşitliği (2.8) eşitliğinde yerine konacak olursa,

$$\Phi(t) = \Phi^s\left(t_r - \frac{\rho}{c}\right) - \Phi_r(t_r) + N(1) \quad (2.8)$$

Bu denkleme iyonosferik (I) ve troposferik (T) etkiler de eklenirse,

$$\Phi(t) = \Phi^s\left(t_r - \frac{\rho}{c} - \frac{I+T}{c}\right) - \Phi_r(t_r) + N(1) \quad (2.9)$$

halini alır.

2.3 Kod Gözlemi Düzeltmesi (Code Pseudorange Smoothing)

Hassas Konum Belirleme çalışmalarında faz ölçüleri kullanılarak kod ölçülerine düzeltme getirilmesi şeklinde geliştirilmiş yöntemlere genel olarak “phase smooting” denir.

Çift frekanslı ölçümlerde t epöğü için, kod ölçümlerinin $R_1(t_1), R_2(t_1)$ ve taşıyıcı faz ölçümlerinin $\Phi_1(t_1), \Phi_2(t_1)$ olduğu varsayılarak kod düzeltmeleri elde edilir. Ayrıca kod ölçümlerinin ilgili taşıyıcı dalga boyu ile bölünmesiyle ölçeklendirildiği varsayılmaktadır (Hofmann et al., 2007). İki frekansın f_1 ve f_2 kombinasyonu kullanılarak;

$$R(t_1) = \frac{f_1 R_1(t_1) - f_2 R_2(t_1)}{f_1 + f_2} \quad (2.10)$$

kod ölçümleri ve taşıyıcı faz ölçüleri için

$$\Phi(t_1) = \Phi_1(t_1) - \Phi_2(t_1) \quad (2.11)$$

geniş dalga boylu bir sinyal oluşur. Tek frekanslı alıcılarda doğal olarak (2.10) ve (2.11) yerine L_1 frekansına ait ölçüler kullanılır. Bu çalışmada da kod pseudorange düzeltmesi L_1 sinyaline dayalı olarak uygulanmıştır.

Günümüz GNSS’de (Global Navigation Satellite Systems) tek kod ölçümlerinde gürültü faktörü 0,7 düzeyindedir, eşitlik (2.10) kullanılarak kod ölçümlerine $R(t_1)$ kombine olacak bir şekilde hatalar yayılarak $\sqrt{f_1^2 + f_2^2} / (f_1 + f_2)$ gürültü etkeni azaltılır. Geniş band sinyallerde gürültü etkisi $\sqrt{2}$ değişkeninin artışa etkisi yoktur çünkü taşıyıcı faz ölçüsünün gürültü etkisi kod ölçüsüne göre daha düşüktür (Hofmann et al., 2007).

Bir epok için (2.10) ve (2.11) düzenlenirse;

$$R(t_i)_{ex} = R(t_1) + (\Phi(t_i) - \Phi(t_1)) \quad (2.12)$$

$R(t_i)_{sm}$ için sonuç değer (2.13) deki gibi hesaplanır.

$$R(t_i)_{sm} = \frac{1}{2} (R(t_i) - R(t_i)_{ex}) \quad (2.13)$$

Bu denklemlerde $R(t_i) = R(t_1)_{ex} = R(t_1)_{sm}$ için $i > 1$ olması gerekir. Buna rağmen taşıyıcı faz verileri tam sayı belirsizlikleri içindeki değişikliklere de duyarlıdır. Bu sorunu aşmak için algoritmaya daha sonra bir değişken verilir. Benzer gösterimler “ t_i ” epokundan önce kullanılarak kod ölçümleri için düzeltme elde edilir (Hofmann et al., 2007).

$$R(t_i)_{sm} = wR(t_i) + (1-w)R(t_i)_{ex} \quad (2.14)$$

(2.14) denkleminde w zamana bağılı ağırlık katsayısıdır. Bundan dolayı; bir önceki formülde $R(t_i)_{ex}$ yerine

$$R(t_i)_{ex} = R(t_{i-1})_{sm} + \Phi(t_i) - \Phi(t_{i-1}) \quad (2.15)$$

(2.15) denklemi kullanılır. (2.14) denklemi düzenlenecek olursa sonuç olarak;

$$R(t_i)_{sm} = wR(t_i) + (1-w)(R(t_{i-1})_{sm} + \Phi(t_i) - \Phi(t_{i-1})) \quad (2.16)$$

denklemi elde edilir. İlk epok için $i=1$, ağırlık katsayısı $w=1$ kabul edilir. İlk epok için tam ağırlık kullanılır (Hofmann et al., 2007). Diğer epoklar için ise kural olarak genellikle $w(t_i) = 1/t_i$ değeri kullanılır (Chen et al., 2000).

2.4 Hassas Konum Belirleme

Navigasyon çözüm algoritması dikkate alındığında, ulaşılabilir doğruluk ile ilgili ana sınırlayıcı faktörler; yörünge hataları, saat hataları ve atmosferik etkilerdir (iyonosferik ve troposferik kırılma). Bu nedenle hassas nokta konum belirlemede (PPP), IGS tarafından sağlanan yörünge ve saat bilgileri, çift frekanslı kod ölçüsü ve/veya kod ölçüsü için taşıyıcı dalga faz gözlemi verileri kullanılır (Hofmann et al., 2007).

Çift frekanslı ölçmelerde kod ölçüleri için eşitlik aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\left[R_1 - \frac{f_2}{f_1} R_2 \right] \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c\Delta\delta + \Delta^{Trop} \quad (2.17)$$

Yukarıdaki denklemde ayrıca troposferik gecikme düzeltmesi de eklenmiştir. İyonosferden bağımsız faz ölçülerine ilişkin eşitlik ise,

$$\left[\Phi_1 - \frac{f_2}{f_1} \Phi_2 \right] \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} = \frac{f_1}{c} \rho + f_1 \Delta \delta + \left[N_1 - \frac{f_2}{f_1} N_2 \right] \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.18)$$

şeklinde ifade edilir.

Kısaca Hassas Konum Belirleme için (2.17) ve (2.18)'deki denklemler düzenlenerek, (2.19) ve (2.20) iyonosferden bağımsız kod ölçümü ve hassas konum belirleme için taşıyıcı faz kombinasyonları elde edilir.

$$\frac{R_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{R_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c \Delta \delta + \Delta^{Trop} \quad (2.19)$$

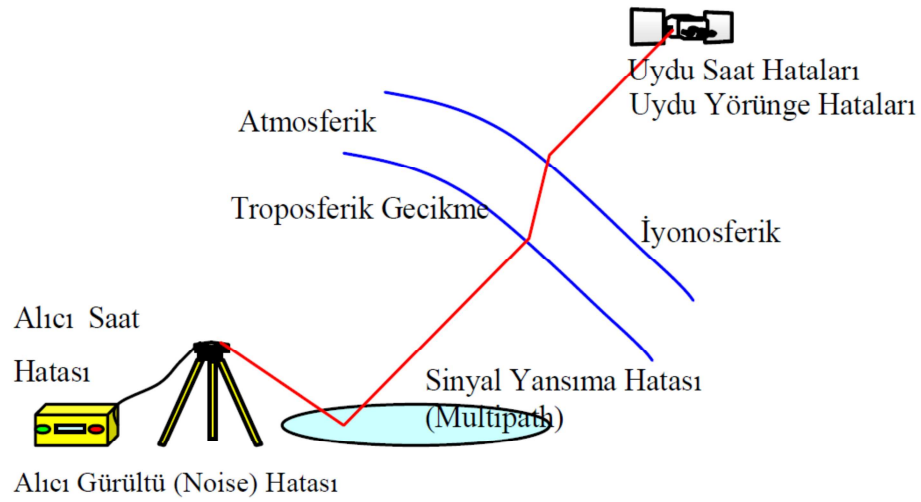
$$\frac{\lambda_1 \Phi_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 \Phi_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c \Delta \delta + \Delta^{Trop} + \frac{\lambda_1 N_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 N_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.20)$$

(2.19) ve (2.20) denklemlerinde kullanılan parametreler; alıcıyla uydu arasındaki geometrik uzunluk (ρ), alıcı saat hatası ($\Delta \delta$), troposferik gecikme Δ^{Trop} ve başlangıç faz belirsizlikleri (N_1 ve N_2)'dir. Bu model hassas konum belirleme de statik ve kinematik ölçü yöntemleri için de kullanılabilir (Hofmann et al., 2007). Hassas konum belirlemeden en iyi düzeyde yararlanabilmek için temel model biraz daha geliştirilmelidir. GPS'in sistematik hata kaynakları bölümünde bahsedilen katı yeryuvarı gelgiti, okyanus yüklemesi, atmosferik etkiler, kutup gezinmesi/kutup gelgiti, katı yeryuvarı gelgiti, yer yuvarı dönme parametreleri ve diğer etkiler de hesaba katılmalıdır.

Ayrıca anten faz merkezi hatası (alıcı ve uydu anteni faz merkezi hatası) ve uydu faz dönmesi hatası da dikkate alınmalıdır. Yapılacak ölçülerin de doğru ağırlıkta olması da hassas sonuçların elde edilmesinde çok önemlidir (Witchayangkoon, 2000; Hofmann et al., 2007).

3. HASSAS KONUM BELİRLEMENİN BİLEŞENLERİ

Hassas konum belirlemede görelî konum belirlemenin aksine troposferik ve iyonosferik etkiden kaynaklanan hataların, tektonik plaka hareketleri etkilerinin, okyanus etkisinin ayrıca uydu ve alıcı saat hatalarının, alıcı ve uydu faz merkezi düzeltmelerinin dikkate alınması oldukça önemlidir (Witchayangkoon, 2000; Hofmann et al., 2007). Hassas konum belirleme çalışmalarında konum doğruluğuna etki eden hatalar ve etkiler bu bölümde detaylı olarak belirtilmektedir.



Şekil 3.1. GPS sinyaline Etki Eden Hata Kaynakları (Tirkakioğlu vd., 2005)

3.1 Uydu Efemeris Hataları

GPS navigasyon mesajı içerisinde yayınlanan uydu konum bilgilerinin doğruluğunun düşük olduğu ya da kasıtlı olarak yanlış yayınlanması durumunda karşılaşılan hataya efemeris hatası denir. Bu hata, modellemesi zor olan bozucu etkilerden birisidir. Örneğin, uydu saat hataları çok duyarlı atomik saatler kullanılarak ya da fark gözlemleri oluşturularak giderilebilmekte, atmosferik etkiler ise çift frekanslı alıcılar kullanılarak veya uygun modellemeler ile en aza indirilebilmektedir. Oysa efemeris hatası uydu yörüngelerinin daha duyarlı hesabını gerektirmektedir (El-Rabbany, 2002).

Efemeris hatası fiziksel açıdan bakıldığında üç bileşenle ifade edilmekte olup, bunlar radyal (radial), teğet (tangential) ve çapraz yörünge (cross-track) hatalarıdır. Bu bileşenlerden en az etkiye sahip olan radyal hatadır. Diğer ikisi radyal hatadan yaklaşık olarak bir kat daha arttırmaktadır. Ancak, uydu-alıcı uzaklıklarının hesabında etkili olan hata kaynağı radyal bileşendir.

Efemeris hatası uydu konumlarının kestirimlerinin bir sonucu olduğundan, bu hatanın büyüklüğü GPS kontrol bölümü tarafından uydulara yapılan en son yükleme zamanından uzaklaştıkça artacaktır.

Efemeris hatası yukarıda açıklanan doğal nedenlerden olabileceği gibi, GPS mesajları içerisinde de kısıtlı olarak arttırılabilmektedir. Bu etkiye Seçimli Doğruluk Eğrişimi (SA:Selective Availability) adı verilmekte olup yalnızca BlockII modeli uydulara uygulanmaktaydı. 1 Mayıs 2000 tarihinden itibaren bu uygulamaya ABD tarafından son verilmiştir (El-Rabbany, 2002; Hofmann et al., 2007; Kahveci ve Yıldız, 2009). Efemeris hatasının nokta konum doğruluğuna etkisi 2 m ile 5 m arasındadır. Eğer SA hala uygulanıyor olsaydı etkisi 50 m civarında olacaktı (El-Rabbany, 2002).

3.2 Uydu Saati Hataları

GPS ile konum belirlemenin temelini zaman ölçümü oluşturduğundan konum belirlemede en büyük hata kaynağı uydu saat hatası oluşturmaktadır. Bu etki uydunun yörüngesinden bağımsız olup ölçü yapılan tüm noktalardaki alıcılar için aynı büyüklüğe sahiptir. GPS uydularında atomik saatler kullanılmasına rağmen kesin doğruluk mümkün değildir. Uydu saat hatasının günlük olarak 8.64 ns ile 17.28 ns arasında olduğu varsayılırsa bu hatanın konum doğruluğuna etkisi yaklaşık olarak 2.59 m ile 5.18 m olacaktır (El-Rabbany, 2002).

Uydu saati hatası GPS kontrol bölümü tarafından sürekli olarak izlenmekte ve yayın efemerisi saat düzeltmeleri günlük olarak navigasyon mesajının bir bölümü olarak yüklenmektedir. Bu düzeltmelerin temel nedeni uydu – alıcı uzaklığının hesaplanmasındaki toplam hatayı olabildiğince azaltmak, bunun için ise uydu saatleri ile GPS zamanı arasındaki yaklaşık 30 nanosaniyelik senkronizasyonu sağlamaktır.

Uydu saat hatası IGS istasyonları tarafından hesaplanarak efemeris verilerine eklenmektedir. SP3 hassas yörünge verilerinde ise sadece bir kolon saat düzeltme verilerini içermektedir (Witchayangkoon, 2000).

3.3 İyonosfer Etkisi

İyonosfer, hava moleküllerinin ileri derecede yoğunlaşmış halde bulunduğu ve elektrik iletkenliği kazandığı, elektromanyetik dalgaları yansıtacak miktarda iyonların ve serbest elektronların bulunduğu yeryüzünden yaklaşık 50 km ile 1000 km arasında yükseklikte bulunan atmosferik tabakadır (Witchayangkoon, 2000).

İyonlaşma ve serbest iyonların yoğunluğu doğrudan güneş ışımaya (radyasyon yoğunluğuna) bağlıdır (Witchayangkoon, 2000). Buradan iyonosferin, elektromanyetik dalgalar üzerindeki etkisinin geceye göre gündüz daha fazla olacağı sonucuna varılabilir.

İyonosferin elektromanyetik dalgaların yayılmasındaki etkisi Toplam Elektron Miktarı (TEC) ile ifade edilmektedir. TEC, uydu – alıcı arasındaki sinyal yolu boyunca m^3 'deki toplam elektron sayısı olarak da ifade edilebilir. TEC, genel olarak, yerel zamanla yaklaşık 14:00 civarında maksimum günlük değere ulaşmaktadır. Gece yarısı ile sabah 05:00 saatleri arasında minimum değere ulaşmaktadır. Bunun dışında gözlenen uydunun yükseklik açısının da iyonosferik etkinin büyüklüğü üzerinde etkisi vardır (El-Rabbany, 2002; Hofmann and vd., 2007; Kahveci ve Yıldız, 2009).

İyonosferin GPS ile yapılan kod ve faz ölçümlerine olan etkileri farklıdır (Witchayangkoon, 2000). Kod ölçümleri için iyonosferik grup gecikme etkisi (group delay) söz konusu iken faz ölçümleri için faz hızlanması (phaseadvance) söz konusudur. Bunun anlamı kod ölçümleri için iyonosfer düzeltmesi $+\Delta^{\text{ion}}$ iken faz ölçümleri için iyonosfer düzeltmesi $-\Delta^{\text{ion}}$ olacaktır (Hofmann et al., 2007).

$$\Delta\rho_R^s(Li) = \frac{A_1.TEC}{f^2(Li)} \quad (3.1)$$

zaman biriminde ise,

$$\Delta t(Li) = \frac{\Delta \rho_R^S(Li)}{c} = \frac{40.3}{c \cdot f^2(Li)} \cdot TEC \quad (3.2)$$

şeklinde yazılabilir. Burada,

c = ışık hızını,

TEC = Toplam Elektron Miktarını

$A_1 = 40.3$

$Li = L_1$ ve L_2 frekanslarını göstermektedir.

Tablo 3.1. Rinex Navigasyon Mesajı İçindeki İyonosfer Model Katsayıları

2.10	N: GPS NAV DATA	RINEX
VERSION / TYPE		
teqc 2010Mar17		20110102 00:00:49UTCPGM /
RUN BY / DATE		
MSXP IAx86-PII bcc32 5.0 MSWin95->XP 486/DX+		COMMENT
GPSBase 2.61 3086		COMMENT
7.4506D-09 -1.4901D-08 -5.9605D-08 1.1921D-07		ION ALPHA
9.2160D+04 -1.1469D+05 -1.3107D+05 7.2090D+05		ION BETA
-3.725290298462D-09-1.332267629550D-14 61440 1617 DELTA-UTC:		
A0,A1,T,W		
		END OF HEADER

GPS ölçümleri tek frekanslı alıcılar ile yapılmışsa çift frekanslı gözlemler ile elde edilen iyonosferik modeller kullanılarak veya uydu navigasyon mesajlarının bir bölümü olarak yayınlanan mevsimlik iyonosfer model katsayıları ($\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3$) kullanılarak “Broadcast İyonosferik Modeli (Klobuchar Modeli)” yardımıyla GPS ölçümlerine iyonosferik düzeltme getirilmektedir (El-Rabbany, 2002; Kahveci ve Yıldız, 2009).

Bu çalışmada “Broadcast İyonosferik Modeli (Klobuchar Algoritması)” yardımıyla, GPS navigasyon mesajı içerisindeki iyonosfer model katsayıları kullanılarak iyonosferik etki giderilmiştir.

- **Broadcast İyonosferik Model Formülasyonu**

GPS navigasyon mesajı içerisinde bulunan parametreler yardımı ile iyonosferik etki hesaplanabilir ve düzeltilebilir. Navigasyon mesajı içerisinde bulunan 8 model düzeltme verisi, konum bilgisi, GPS zamanı, azimut ve elevasyon açısı kullanılarak hesaplama yapılmaktadır (Xu, 2007).

Tez Çalışmasında “ion.m” isimli matlab programı aşağıdaki formüller yardımıyla yazılmıştır.

Aşağıdaki formülasyonda; 8 adet broadcast iyonosferik model katsayıları (α_i , β_i , $i=1, 2, 3, 4$) ve alt iyonosferik noktasının jeodezik enlemi φ , boylam değerleri ise λ_i ’dir. İyonosferik nokta uydunun görüş noktasıdır ve bu noktanın ortalama yüksekliği (350km)’dir. Alt iyonosferik nokta ise iyonosferik noktanın Dünya düzlemindeki projeksiyon noktasıdır. ϕ alt iyonosferik noktanın jeo-manyetik enlem olarak 50 km yüksekliğinde olan noktadır. ψ ise dünyanın merkezinden GPS istasyonu ile iyonosferik nokta arasında kalan açıdır. F eğim faktörü veya sinyal yolu üzerindeki iyonosferik etkinin olduğu haritalama fonksiyonudur. Yerel zaman alt iyonosferik noktasında t ile gösterilir. P ve Q ile de süre ve genlik saniye birimi olarak ifade edilmektedir (Xu, 2007).

$$F = 1 + 16(0.53 - E)^3 \quad (3.3)$$

$$\psi = \frac{0.0137}{E + 0.11} - 0.022 \quad (3.4)$$

$$\varphi_i = \varphi + \psi \cos A \quad (3.5)$$

$$\varphi_i = \frac{0.416\varphi_i}{|\varphi_i|}, \quad \text{eğer} \quad |\varphi_i| > 0.416 \quad (3.6)$$

$$\lambda_i = \lambda + \psi \frac{\sin A}{\cos \varphi_i} \quad (3.7)$$

$$\phi = \varphi_i + 0.064 \cos(\lambda_i - 1.167) \quad (3.8)$$

$$t = \lambda_i 43200 + T \quad (3.9)$$

$$t = t - 86400, \quad e\check{g}er \quad t \geq 86400 \quad (3.10)$$

$$t = t + 86400, \quad e\check{g}er \quad t < 0 \quad (3.11)$$

$$P = \sum_{i=1}^4 \beta_i \phi^i \quad (3.12)$$

$$P = 72000, \quad e\check{g}er \quad P < 72000 \quad (3.13)$$

$$x = \frac{2\pi(t - 50400)}{P} \quad (3.14)$$

$$Q = \sum_i^4 \alpha_i \phi^i \quad (3.15)$$

$$Q = 0, \quad e\check{g}er \quad Q < 0 \quad (3.16)$$

$$\delta_g(f_1) = cF 5 \times 10^{-9}, \quad e\check{g}er \quad |x| > 1.57 \quad ve \quad (3.17)$$

$$\delta_g(f_1) = cF \left(5 \times 10^{-9} + Q \left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{4} \right) \right), \quad e\check{g}er \quad |x| < 1.57 \quad (3.18)$$

3.4 Troposfer Etkisi

GPS uydularından yayınlanan sinyaller atmosfere girmeden önce uzaydaki boşlukta ilerler. Bu sinyaller atmosfere girdiklerinde geçtikleri ilk tabaka iyonosferdir.

Troposfer, havanın yeryüzü ile temas halinde olan en alt tabakasıdır. Kalınlığı kutuplarda yaklaşık 8 km, ekvator da ise yaklaşık 16 km'dir. İyonosfer tabakasının aksine troposfer tabakası elektrik yüklü olmadığından yaklaşık 15 GHz'e kadar olan radyo frekansları için dağıtıcı özelliğe sahip değildir. Bu nedenle troposfer tabakasındaki GPS sinyallerinin yayılması frekansa bağlı değildir. Troposferik etki GPS alıcılarının çift frekans özelliğinden yararlanılarak elemine edilememektedir (El-Rabbany, 2002; Hofmann et al., 2007).

Troposferik etkinin yaklaşık %90'ı kuru bileşen ve geri kalan %10'luk kısmı ise ıslak bileşenden oluşmaktadır (Hofmann et al., 2007). Kuru bileşenin troposferdeki değişimi çok küçük olup, 40 km ve daha yukarı yüksekliklerde göz ardı edilebilir. Islak bileşen ise yalnızca yere yakın yükseklikler (0-5 km) için önemlidir (Hofmann et al., 2007; Kahveci ve Yıldız, 2009).

Troposferik gecikme, GPS sinyalinin troposfer katmanında kat ettiği yola bağlı olduğundan aynı zamanda uyduya olan zenit açısının bir fonksiyonu olacaktır. Bu nedenle GPS ile gözlemlerde ve değerlendirmelerde uydu sinyali yükseklik açısı 15° ve yukarısı seçilmelidir. Daha küçük açılarının kullanılması sinyal yansıma etkilerine neden olmaktadır (Kahveci ve Yıldız, 2009).

Troposferik gecikme hesabında kullanılan atmosferik parametreler standart troposferik modellerden, gözlem noktasında ölçülen meteorolojik verilerden (basınç, kuru ısı ve ıslak ısı) veya su buharı radyometrelerinden ve radyo sondajlarından yararlanarak elde edilmektedir.

GPS gözlemi yapılan noktada atmosferik parametrelerin ölçümü; kullanılan aletlerin kalibrasyon hataları, yapılan atmosferik ölçülerin noktanın üstündeki sinyal yolunu iyi temsil edememesi gibi nedenlerle, elde edilen GPS sonuçlarında önemli

hatalara neden olmaktadır. Bu sakıncalardan kaçınmak için standart atmosfer modelinden yararlanarak hesaplanan atmosferik verilerin kullanılması günümüzde GPS gözlemlerinin değerlendirilmesinde oldukça yaygındır (Kahveci ve Yıldız, 2009). Tez çalışmasında troposferik etkileri elemine edebilmek için “Saastamoinen Modeli” kullanılmıştır.

- **Saastamoinen Troposferik Model Formülasyonu:**

Saastamoinen troposferik modeli kullanılarak troposferik gecikme hatası elemine edilebilmektedir.

$$\delta = \frac{0.002277}{\cos z} \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) e - B \tan^2 z \right] + \delta R \quad (3.19)$$

Burada “ z ” uydu ile olan zenit açısını, T Kelvin biriminde istasyon sıcaklığını, P milibar biriminde atmosferik basıncı, e kısmi su basıncını (milibar) ifade etmektedir. B ve yükseklik (H) ve zenit açısına (z) bağlı terimlerdir. H istasyon noktasının yüksekliğidir. δ ise metre mertebesinde troposferik gecikmedir.

$$e = R_h \exp(-37.2465 + 0.213166T - 0.000256908T^2) \quad (3.20)$$

Denkleminde ise R_h bağıl nemi (% olarak) ve “ $\exp$ ” de üstel fonksiyonu tanımlamaktadır. B ve δ ise tablo 3.2 ve tablo 3.3 deki değerler kullanılarak hesaplamalara katılmaktadır.

$$T(K) = T(Celsius) + 273.16 \quad (3.21)$$

Sıcaklık birimi Kelvine çevrilir. Yüksekliğe bağlı basınç ise sıcaklık ve nem değerleri kullanılarak aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanır.

$$P = P_0 \left[1 - 0.000226(H - H_0) \right]^{5.225} \quad (3.22)$$

$$T = T_0 - 0.0065(H - H_0) \quad (3.23)$$

$$R_h = R_{h_0} \exp[-0.0006396(H - H_0)] \quad (3.24)$$

Bu denklemlerdeki T_0 , P_0 ve R_{h_0} standart sıcaklık, basınç ve nem değerlerinin H_0 noktasında hesaplanmış halidir. Bu değerler ölçü noktasının konumuna ve mevsimlere göre değişiklik gösterebilirler (Xu, 2007).

Standart değerler ise aşağıdaki gibidir;

$$H_0 = 0 \text{ m}$$

$$P_0 = 1013.25 \text{ mbar}$$

$$T_0 = 18^\circ \text{ Celsius}$$

$$R_{h_0} = 50\%$$

Tablo 3.2. Basıncın (B) yüksekliğe (H) bağlı fonksiyon değerleri

H (km)	B (mbar)
0.0	1.156
0.5	1.079
1.0	1.006
1.5	0.938
2.0	0.874
2.5	0.813
3.0	0.757
4.0	0.654
5.0	0.563

Tablo 3.3. δR 'nin yükseklik (H) ve zenit açısına (z) bağlı fonksiyon değerleri

H (km)	z (derece)												
	60.00	66.00	70.00	73.00	75.00	76.00	77.00	78.00	78.50	79.00	79.50	79.75	80.00
0.0	0.003	0.006	0.012	0.020	0.031	0.039	0.050	0.065	0.075	0.087	0.102	0.111	0.121
0.5	0.003	0.006	0.011	0.018	0.028	0.035	0.045	0.059	0.068	0.079	0.093	0.101	0.110
1.0	0.002	0.005	0.010	0.017	0.025	0.032	0.041	0.054	0.062	0.072	0.085	0.092	0.100
1.5	0.002	0.005	0.009	0.015	0.023	0.029	0.037	0.049	0.056	0.065	0.077	0.083	0.091
2.0	0.002	0.004	0.008	0.013	0.021	0.026	0.033	0.044	0.051	0.059	0.070	0.076	0.083
3.0	0.002	0.003	0.006	0.011	0.017	0.021	0.027	0.036	0.042	0.049	0.058	0.063	0.068
4.0	0.001	0.003	0.005	0.009	0.014	0.017	0.022	0.030	0.034	0.040	0.047	0.052	0.056
5.0	0.001	0.002	0.004	0.007	0.011	0.014	0.018	0.024	0.028	0.033	0.039	0.043	0.047

3.5 Sinyal Yansıma (Multipath) Etkisi

GPS alıcıları ile birlikte kullanılan antenlerin hemen hemen tamamı tüm yönlerden gelen uydu sinyallerini eş zamanlı alabilme özelliğine sahiptir. Antenin kurulduğu arazi yapısına ve sinyal yükseklik açısına bağlı olarak kaydedilen uydu sinyallerine istenmeyen sinyal yansımalarının da karışması söz konusudur.

Uydulardan yayılan sinyallerin yeryüzünde herhangi bir noktada kurulu olan antene, bir veya daha fazla sayıda yol izleyerek ve esas sinyale karışarak ulaşmasına sinyal yansıma (multipath) etkisi denir (El-Rabbany, 2002; Kahveci ve Yıldız, 2009).

Eğer anten aynı noktada üzerinde hiç ayrılmadan birkaç gün sabit olarak tutulursa, söz konusu etki günlük yaklaşık olarak 4 dakikalık bir değişimle tekrar edecektir. Bunun nedeni uydu – yansıtıcı yüzey – anten geometrisinin sürekli olarak tekrar etmesidir. Bu özellikten yararlanarak anten sinyal yansımasının ana etkisi hesaplanarak gözlemler düzeltilebilir. Ayrıca iyonosferden bağımsız kod düzeltmesi ve kod ölçüleri kullanılarak sinyal yansıma hatası elemine edilebilir (Hofmann et al., 2007).

3.6 Alıcı Anteni Faz Merkezi Hatası

Alıcı anteni faz merkezi GPS sinyallerinin antene ulaştığı nokta olup bu nokta genellikle geometrik faz merkezinden farklıdır. İdeal olarak GPS anteninin faz merkezinin, antene ulaşan sinyalin geliş doğrultusundan bağımsız olması gerekir. Azimut ve yükseklik açısına bağlı olarak meydana gelen hatalar L_1 ve L_2 sinyali için farklıdır. Bu nedenle özellikle yüksek doğruluk gerektiren yer kabuğu hareketlerinin belirlenmesi, jeodezik uygulamalar gibi çalışmalarda anten faz merkezi değişimlerinin de GPS ölçümlerinin değerlendirilmesinde dikkate alınması gerekmektedir (El-Rabbany, 2002; Kahveci ve Yıldız, 2009).

Anten faz merkezi değişim miktarı her anten yapısı ve modeli için farklı olduğundan modellendirilmesi oldukça zordur ve yaklaşık olarak birkaç santimetre büyüklüğündedir. Aynı yapı ve model antenler benzer değişimler gösterdiğinden, antenler aynı doğrultuya (genellikle manyetik kuzeye) yönlendirilerek göreceli konum

belirleme yönteminde bu etki en aza indirilmektedir (El-Rabbany, 2002; Kahveci ve Yıldız, 2009).

Jeodezik amaçlı antenlerde, genellikle faz merkezi yatay konumda anten fiziksel merkezi ile aynı olup, esas sorun düşey bileşendir. Bu etkinin dikkate alınmaması, baz uzunluğundan bağımsız olarak genellikle istasyon yüksekliğinde 10cm' ye varan hataya neden olmaktadır. Bu nedenle, ortalama faz merkezleri anten fiziksel referans merkezine göre çok iyi bilinmeli ve arazide yapılan anten yüksekliği ölçümleri yeterli titizlikte ve *milimetre* duyarlılıkta yapılmalıdır. Eğer GNSS ağında değişik tip ve model antenler kullanılıyorsa ve troposferik parametreler de hesaplanacaksa, mutlak faz merkezi değişimlerini içeren Faz Merkezi dosyaları mutlaka kullanılmalıdır (Kahveci, 2010). Hasas nokta belirleme (PPP) çözümlerinde, bu hatalar, sonuçları direkt olarak etkilemeleri bakımından, özellikle yükseklik bileşeni için dikkate alınmaları gerekir.

3.7 Uydu Anteni Faz Merkezi Hatası

Uydulara bağlı düzeltmelerin temelini, uydu ağırlık merkezi ile uydu anteninin faz merkezi arasındaki fark oluşturmaktadır. Çünkü uydu yörünge hesabında kullanılan uydulara etki eden kuvvetlerin modellendirilmeleri uydu ağırlık merkezine göre yapılmaktadır. Aynı şekilde, IGS sonuç yörünge ve saat bilgileri de uydu ağırlık merkezine göredir. Oysa uydu gözlemleri de anten faz merkezine göre yapılmaktadır (Kouba 2009).



Şekil 3.2. Uydu Anteni Faz Merkezi Kayıklıkları (Kouba, 2009)

Bu nedenle uydu anteni faz merkezi farklılığı hassas konum belirleme (PPP: Precise Point Positioning) için ele alınmalıdır. Çiftli farklarda bu farklılık elemine olur. Uydu anteni faz merkezi değerleri, uydu sabit koordinat sisteminde verilmekte ve aynı zamanda güneş radyasyon basıncını ifade etmek içinde kullanılmaktadır. Bu koordinat sisteminin merkezi uyduların kitle merkezidir, Z eksenini dünyanın merkezine doğru, Y eksenini güneş panelleri eksenine doğrultusunda, X eksenini de sağ el kuralını tamamlamakta ve Güneş, uydu ve Dünya aynı düzlemde konumlanmaktadır. Bu sistem Güneş, uydu ve Dünya Doğrusal olmadığı zaman bozulur. Bundan dolayı ve uydu dünyanın gölgesinin içinde olduğu zaman uydunun konumu tutarsız ve karmaşık bir model içinde olur (Witchayangkoon, 2000). Bu durumda da çok uzun bazlar için 10cm' ye varan hatalar ortaya çıkacaktır. Güneş-uydu-dünya aynı düzlemde bulunmadıkları zaman uydu yörünge hesaplamalarında kullanılan radyasyon ışıması parametrelerinin modellenmesi neredeyse olanaksız hale gelmektedir (Kahveci, 2010).

Tablo 3.4. GPS Uydu Anteni Faz Merkezi Kayıklığı (Xu, 2007)

Block II/IIA : (i, j, k) =	(0.2794m, 0.0000m, 1.0259m)
Block IIR : (i, j, k) =	(0.0000m, 0.0000m, 1.2053m)

3.8 Uydu Faz Dönmesi (Phase Wind Up)

Taşıyıcı dalga faz gözlemi, alıcı ve uydu antenlerinin karşılıklı yönlendirilmelerine bağlıdır. Alıcı ya da uydu anteninin kendi düşey eksenini etrafında bir tur döndürülmesi, taşıyıcı dalga fazının bir dalga boyu kadar kaymasına neden olmaktadır. Bu etkiye “Faz dönme etkisi” adı verilmektedir (Kouba, 2009).

GPS/GNSS ölçülerinde bu ve benzeri hata kaynaklarından kaçınmak için, gerçek zamanlı GNSS (RTK: Real Time Kinematic) amaçlı ölçmeler hariç statik ölçmelerde alıcı antenleri genelde kuzeye yönlendirilmektedir. Ancak, durum uydu antenleri için biraz farklıdır. Uydu antenleri güneş panelleri güneşe doğru ayarlanırken küçük dönmelere maruz kalmakta ve böylece uydu-istasyon geometrisi olumsuz etkilenmektedir. Daha da ötesi, uyduların belirli bir süre karanlıkta kaldığı (eclipsing) dönemlerde uydu güneş panelleri tekrar güneşe doğru ayarlanmaktadır.

Bunun sonucunda uydu anteni için yaklaşık yarım saat süre içerisinde tam bir dönüş karşılık gelen faz dönmeleri söz konusu olmaktadır. Bu durumlarda da faz ölçülerine düzeltme getirilmesi gerekmektedir (Kouba, 2009). Bu etki 100km'lik baz uzunluklarında ve görelî konum belirlemelerde göz ardı edilebilmektedir. Örneğin, 4000 km'lik bir baz uzunluğunda bu etkinin yaklaşık 4cm'lik hataya neden olduğu belirlenmiştir (Kouba, 2009). Ancak, bu etkinin özellikle PPP uygulamalarında dikkate alınması çok önemlidir. Çünkü bu yöntemde IGS saat bilgisi hatasız kabul edilmektedir ve bu da hesaplamalarda yaklaşık yarım dalga boyu bir hataya karşılık gelebilmektedir.

1994 yılından bu yana tüm IGS analiz merkezleri bu düzeltmeleri hesaplamalarında uygulamaktadır. Bu etkinin göz ardı edilmesi ve IGS yörünge/saat bilgilerinin hatasız kabul edilmesi, konum ve alıcı saati hesabında *desimetre* mertebesinde hatalara neden olabilmektedir. Kinematik GNSS ölçülerinde ise bu hata kaynağı ikili faz farkları oluşturularak giderilmekte ve/veya alıcı saati hesabındaki parametrelere dahil olmaktadır (Kouba, 2009).

3.9 Yer Yuvarı Dönme Parametreleri (ERP: Earth Rotation Parameters)

Bilindiği gibi uydu hareket denklemleri göksel koordinat sisteminde (inersiyal), yeryüzündeki nokta koordinatlar ise yersel koordinat sisteminde tanımlanmaktadır. Uluslararası gök koordinat sistemi (ICRS: International Celestial Reference System) uygulamada gökyüzünde düzgün dağılan dünya dışı radyo kaynaklarının J2000.0 epöğündeki ekvatorial koordinatlar ile tanımlanmakta ve bu sisteme ICRF (International Celestial Reference Frame) adı verilmektedir. Uluslararası yersel koordinat sistemi (ITRS; International Terrestrial Reference System) farklı teknikler kullanılarak elde edilen sabit istasyon koordinatları ve hızları ile belirlenmekte ve buna ITRF (International Terrestrial Reference Frame) adı verilmektedir. GPS verilerinin değerlendirilmesi aşamasında nokta koordinatları ile uydu koordinatları aynı referans sisteminde tanımlanmalıdır. Bu dönüşümü yapabilmek için zamana bağılı fonksiyon (UT1 – UTC) kullanılır. Bu da ITRF ve

ICRF sistemleri arasındaki dönüşüm parametrelerinin bilinmesini gerektirmektedir (McCarthy and Petit, 2003; Petit and Luzum, 2010; Kahveci, 2010).

Yeryuvarı dönme ekseninin doğrultusu zamana bağlı olarak değişmektedir. Değişim vektörünün doğrultusu anlık dönme eksenini doğrultusuna, büyüklüğü ise yeryuvarının dönme hızına eşittir. Yeryuvarının dönmesi düzenli bir hareket olmayıp, bunun nedenleri; presesyon, nutasyon, kutup gezinmesi ve universal zaman (UT1)'dir. Kısaca özetlenecek olursa yer dönme vektöründeki değişimlerin nedenleri olarak; güneşin, ayın ve gezegenlerin çekim etkileri ile yeryüzündeki okyanus ve yeraltı su hareketleri, atmosferik etkiler sayılabilir (Petit and Luzum, 2010; Kahveci, 2010). Bu parametreler inersiyal referans sistemi (ICRF) ile yersel referans sistemi (ITRF) arasındaki dönüşümü sağlar. Bu dönüşümün sonucunda uydu yörüngeleri ITRF sisteminde elde edilmiş olur. Bu etkilerin detayları ve hesaplama yöntemleri International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) Convension (2010) da bulunabilir.

Bilimsel amaçlı çalışmalarda belirtilen dönüşümlerin daha hassas yapılabilmesi için yarım günlük ERP (Earth Rotation Parameters) değişimleri de dikkate alınmalıdır. Çünkü ERP okyanus yüklemesinin günlük ve yarım günlük periyotlarından önemli ölçüde etkilenmektedir. Bu etki yeryüzünde 3 cm büyüklüğündedir (Kahveci, 2010).

3.10 Kutup Gezinmesi/Kutup Gelgiti (Polar Motion/Polar Tides)

Yeryuvarını etkileyen dış kuvvetler olmasa bile, yeryuvarının elastik yapısı, atmosfer ve okyanusların katı yeryuvarı (litosfer) etkileri nedeniyle yine de onun dönme ekseninde değişim olacaktır (Petit and Luzum, 2010; Kahveci, 2010). Ayın ve Güneşin çekim etkileri, istasyon koordinatlarında periyodik değişimlere neden olmaktadır. Aynı şekilde yeryuvarı dönme ekseninin, katı yeryuvarına (litosfer) göre yer değiştirmesi (kutup gezinmesi), periyodik deformasyonlara neden olmaktadır. Günümüze kutup gözlem doğruluğu yaklaşık $0''.3 - 0''.5 \times 10^{-3}$ mertebesinde olup bu da yeryüzünde yaklaşık 1.0 – 1.5 cm büyüklüğe karşılık gelmektedir (IERS Annual Report, 2007; Kahveci, 2010). Kutup gelgit etkisinin yükseklikte en çok 25 mm, yatay doğrultuda ise en çok 7 mm'ye ulaşabildiği belirlenmiştir (Kouba, 2009).

3.11 Okyanus Yüklemesi (Ocean Loading)

Okyanus yüklemesi, okyanus gelgitlerinin alttaki yerkabuğuna baskısı olarak tanımlanabilir. Günlük ya da yarım günlük periyotlar halinde gösterilir. Yeryüzü gelgitine göre etkisi daha küçüktür. Yerel etki gösterir ve sabit kısmı yoktur. 24 saat süreli statik gözlemlerde ve okyanus kıyısından uzaktaki (> 1000 km) istasyonların hesabında göz ardı edilebilir. Ancak, istasyon okyanusa yakınsa ve troposferik ıslak bileşen ve alıcı saat hatası hesaplanacaksa, 24 saatlik statik gözlemlerde bile bu etki mutlaka dikkate alınmalıdır (Kouba 2009). Aksi durumda okyanus yüklemesi troposferik etki ve alıcı saat hataları olarak çözümlere yansımaktadır (Kahveci, 2010).

3.12 Katı Yeryuvarı Gelgiti (Solid Earth Tides)

Katı yeryuvarı, aslında okyanus gelgitine neden olan çekim kuvvetlerine karşı yeteri kadar esnek yapıdadır. Gelgitler nedeniyle oluşan düşey ve yatay doğrultudaki istasyon yer değiştirmeleri küresel harmoniklerle (Love Number h_{nm} ve Shida number l_{nm}) ifade edilmektedir. İstasyon konumlarında 1 *milimetre* civarında doğruluklar hedefleniyorsa katı yeryuvarı etkisi dikkate alınması gereken bir etkidir. 5 *milimetre* doğruluk için gelgit teriminin ikinci dereceye kadar alınması ve yükseklik düzeltmesinin yapılması yeterlidir (McCarthy and Petit, 2003; Petit and Luzum, 2010; Kahveci, 2010). Gelgit düzeltmesi, enlem bağımlı sabit kısım ve periyodik kısım olmak üzere iki bileşenle ifade edilmektedir. Bu düzeltme ölçü noktası mutlak konumunda yatay doğrultuda 5cm, radyal doğrultuda 30cm değerlerine ulaşabilmektedir. Periyodik kısım, 24 saatlik statik gözlem yapılarak ortalama bir değere getirilmektedir. Ancak sabit kısım (orta enlemlerde 12cm kadar) 24 saatlik statik gözlem ile giderilememektedir. Bu nedenle, gelgit etkileri hesaplamalarda ITRF ile uyumlu olarak dikkate alınmalıdır. Bu etkinin ihmal edilmesi özellikle Hassas Konum Belirlemede (PPP: Precise Point Positioning) önemli sistematik hataya neden olacaktır (Kouba 2009). Eğer bu etki hesaplamalarda dikkate alınmazsa, hassas mutlak konum belirlemede uzun süreli statik gözlem yapılsa bile ölçü noktası mutlak konumunda radyal doğrultuda 12cm, kuzey doğrultusunda ise 5cm sistematik hata olma olasılığı vardır. Diğer taraftan baz

uzunluklarının 100km'den küçük olduğu görelî konum belirlemelerinde ise bu etki bazın her iki ucunda da aynı kabul edilebileceğinden büyük oranda giderilmektedir (Kouba 2009).

3.13 İstasyon Hızları/Konum Değişimleri (Site Displacement Effects)

GPS/GNSS istasyonları genel olarak periyodik hareketlere maruz kalmaktadır. Periyodik istasyon hareketlerinin büyük bölümü, yeryüzünün önemli bir kısmı için yaklaşık aynı kabul edilebilir. Görelî konum belirlemede 100km'den küçük baz uzunlukları için bu etkilerin yok edildiği kabul edilmektedir. Bunların büyüklüğü yaklaşık *desimetre* mertebesindedir.

Ancak;

- PPP yöntemi kullanılarak ve ITRF ile uyumlu istasyon koordinatları belirlenmek isteniyorsa,
- 500km ve daha uzun bazlarda görelî konum belirleme yöntemi kullanılacaksa,
- Jeofizik ve/veya ülke datumu belirleme amaçlı çalışmalar yapılıyorsa

bu istasyon hareketleri IGS standartlarında belirtildiği/uygulandığı şekilde modellenmelidir. Öte yandan 1cm'nin altında istasyon hareketlerine neden olan başka etkiler (atmosferik yükleme, yeraltı suyu/toprak nemi, kar kütlesi etkisi vb.) de vardır (Kouba, 2009; Kahveci, 2010). Bu bölüme kadar anlatılan hassas konum belirlemede dikkate alınması gereken hata kaynakları ve etkileri Tablo 3.5'de özet olarak sunulmuştur.

Tablo 3.5. Hassas Konum Belirlemede Dikkate Alınması Gereken Hata Kaynaklarının Ölçü Noktasında Etki Büyüklükleri (Witchayangkoon, 2000; Petit and Luzum, 2010; Tıǧlı, 2009)

Hata Adı	Etki Büyüklüğü	Açıklama
Katı Yeryuvarı Gelgiti (Solid Earth Tide)	Desimetre	24 saatlik gözlem yapılsa bile hesaba katılmaz ise oluşabilecek hata miktarının maksimum büyüklüğüdür.
Okyanus Etkisi (Ocean Loading)	Santimetre	Okyanus Kıyısından 1000km uzakta olan ölçü noktalarında hesaba katılmaz.
Atmosferik Basınç	Milimetre	Çoğu araştırmada etkisi 25mm'den küçüktür.
Kutup Gezinmesi (Pole Tide)	2cm radyal, 7cm yatay konuma, 25cm de düşey konuma etkisi vardır.	Yeryuvarı dönme ekseninin, katı yeryuvarına göre yer değiştirmesi nedeniyle oluşur.
Troposferik Etki	~ 2.2m	10 ^o nin altında gözlenen uydularda ~14m
İyonosferik Etki	GPS sinyallerine 100 ns' lik etki yapar.	~10m ile ~100m arasındadır.
Uydu ve Alıcı Faz Merkezi Hatası	Ayrı ayrı olarak 10cm lik hata etkileri vardır.	Sinyalin uydudan çıkış noktası ile alıcıya geliş noktasının geometrik merkezden farklı olması.
Sinyal Yansıma Hatası (Multipath)	Etki büyüklüğü 10m ile 300m arasındadır.	Antenin kurulduğu arazi yapısı ve sinyal yükseklik açısına bağlı olarak hata miktarı değişir.
Uydu Saati ve Yörünge Hatası	Uydu saat hatası 2m ile 25m arasındadır.	Uydu yörünge hatası ise 1m ile 5m arasındadır.

4. UYGULAMA

4.1 Çalışma Alanı ve Veriler

Çalışma veri seti olarak ISTA isimli IGS noktası seçilmiştir. ISTA noktasına ait 24 saatlik RINEX verileri SOPAG arşivinden temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan RINEX gözlem veri dosyası (observation file data) 30 sn aralıklıdır. Ayrıca çalışma yapılan güne ait IGS Hassas Efemeris (sp3: Standard Product 3) verisi de SOPAG arşivinden temin edilmiştir.

Çalışmada kullanılan veri formatı RINEX (Receiver INdependent EXchange format) 1989 yılında jeodeziciler için uluslararası standart alıcıdan bağımsız veri değişim formatı olarak kabul edilmiştir (National Geodetic Survey RINEX, 2010). RINEX verileri ASCII formatında üretilmektedir. Bu çalışmada RINEX gözlem veri dosyası (observation file data) ve navigasyon dosyası (navigation file data) analiz çalışmalarında kullanılmıştır.

SP3 Duyarlı Efemeris verisinin üretilmesinden ise ABD NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) sorumludur. SP3 (Standart Product 3) duyarlı efemerisi ITRF sisteminde ve IERS noktalarına ait duyarlı koordinatlar kullanılarak hesaplanmakta olup bu veri de ASCII formatında üretilmektedir (National Geodetic Survey Standart GPS Format SP3, 2010). Çalışmada kullanılan SP3-c duyarlı efemerisinde tüm uydular için 15 dk.'lık zaman dilimi periyotları halinde X, Y, Z uydu koordinat düzeltmeleri ve uydu saat düzeltme değerleri bulunmaktadır. SP3 verisindeki koordinat düzeltme değerlerinin hassasiyeti milimetre doğruluğunda ve zaman düzeltme değerlerinin hassasiyeti de 0,1 nanosaniyeden daha iyidir.

Çalışmaya altlık olarak kullanılan programlar Kai Borre tarafından 2001 yılında MATLAB yazılımında geliştirilmiştir. Easy3 olarak isimlendirilen bu yazılım ise Kai Borre'un sitesinden temin edilmiştir (<http://kom.aau.dk/~borre/easy/>). Kai Borre tarafından geliştirilen program RINEX verilerini kullanarak sadece GPS konum bilgilerini hesaplamaktadır. Tek Frekanslı GPS alıcıları ile hassas konum

belirleme üzerine yapılan çalışmada ise Easy3 isimli program üzerine GYTE jeodezi anabilim dalında geliştirilen ilave kodlar ve eklenen programlar uygulama adımları ile birlikte Bölüm 4.2 de verilmiştir.

Hassas konum belirlemenin bileşenlerinden olan katı yer yuvarı etkilerinin ölçü noktasındaki etkilerinin hesaplanmasında ise Dennis Milbert tarafından Fortran programında geliştirilmiş olan “solid.exe” isimli programdan yararlanılmıştır. Bu program katı yer yuvarı etkilerini IERS Conventions (2003) de belirtilen parametrelere göre hesaplamaktadır. Analiz çalışmalarına geçmeden önce “solid.exe” isimli program yardımı ile hesaplamaların gerçekleştirildiği günlere ait katı yer yuvarı etkileri çalışma noktasının enlem ve boylam değerleri ile ölçü günleri programa girilerek elde edilmiştir. Sonuç dosyası text dosyası olarak Şekil 4.1’de gösterildiği gibidir. Sonuç dosyasın da 60 saniyede bir ölçü noktasındaki katı yer yuvarı etkisinin x, y, z olarak değerleri verilmektedir.

```

year,month,day= 2011 2 1
lat, East lon.= 41.104448100 29.019342030
0.0 -0.019851 -0.057441 0.095766
60.0 -0.019641 -0.057561 0.094505
120.0 -0.019430 -0.057677 0.093241
180.0 -0.019219 -0.057791 0.091975
240.0 -0.019008 -0.057901 0.090706
300.0 -0.018797 -0.058008 0.089434
360.0 -0.018586 -0.058111 0.088160
420.0 -0.018375 -0.058212 0.086884
480.0 -0.018163 -0.058309 0.085606
540.0 -0.017952 -0.058403 0.084325
600.0 -0.017740 -0.058494 0.083042
660.0 -0.017529 -0.058582 0.081758
720.0 -0.017317 -0.058666 0.080471
780.0 -0.017106 -0.058747 0.079183
840.0 -0.016894 -0.058825 0.077892
900.0 -0.016683 -0.058900 0.076600
960.0 -0.016471 -0.058971 0.075307
1020.0 -0.016260 -0.059039 0.074011
1080.0 -0.016049 -0.059104 0.072715

```

Şekil 4.1. Katı Yer Yuvarı Etkisi Sonuç Değerleri

Şekil 4.1 de gösterilen solid.txt dosyasındaki zaman dilimi analiz yapılan günün GPS zamanına göre düzenlenerek dosya program dosyalarının içine kayıt edilmiştir (Tablo 4.1).

Tablo 4.1. Katı Yer Yuvarı Etkisi Sonuç Değerlerinin GPS Zamanına Göre Düzenlenmesi

172800	-0.019851	-0.057441	0.095766
172860	-0.019641	-0.057561	0.094505
172920	-0.019430	-0.057677	0.093241
172980	-0.019219	-0.057791	0.091975
173040	-0.019008	-0.057901	0.090706
173100	-0.018797	-0.058008	0.089434
173160	-0.018586	-0.058111	0.088160
173220	-0.018375	-0.058212	0.086884
173280	-0.018163	-0.058309	0.085606
173340	-0.017952	-0.058403	0.084325
173400	-0.017740	-0.058494	0.083042
173460	-0.017529	-0.058582	0.081758
173520	-0.017317	-0.058666	0.080471
173580	-0.017106	-0.058747	0.079183
173640	-0.016894	-0.058825	0.077892
173700	-0.016683	-0.058900	0.076600
173760	-0.016471	-0.058971	0.075307
173820	-0.016260	-0.059039	0.074011
173880	-0.016049	-0.059104	0.072715
173940	-0.015838	-0.059166	0.071417
174000	-0.015627	-0.059224	0.070117

4.2 Verilerin ve Düzeltme Değerlerinin Programa Eklenmesi

Ölçme ve yörünge bilgilerini içeren dosyaların programda tablo 4.2 deki şekilde okutulmaktadır. Uyduların koordinatları hassas yörünge dosyasından (*.sp3) hesaplanırsa da ölçülere getirilecek rölativite etkisi düzeltmelerini hesaplayabilmek ve ionosfere ait model katsayılarını kullanabilmek amacıyla RINEX navigasyon dosyası da kullanılmaktadır.

```

typ_orbit =1; %Using precise ephemerides(igs *.sp3 files #c format)
if (typ_orbit == 1)
    sp3eph_c(' igs16212.sp3','coef_X.dat',.....);
    [eph1, eph2, .....] = get_pre_eph('coef_X.dat','coef_Y.dat',.....);
end
rinexe('ista0320.11n','eph.dat')
Eph = get_eph('eph.dat');
ofile1 = 'ista0320.11o';
fid1 = fopen(ofile1,'rt');
e_tidefile='solide4.txt';
[cfX,cfY,cfZ,mx,my,mz]=solide(e_tidefile);

```

Şekil 4.2. Veri Değerlerinin Programa Tanıtılması

Hesaplama yapılacak günün GPS zamanına göre düzenlenerek Tablo 4.1’de görüldüğü gibi kayıt edilen katı yer yuvarı etkisi dosyası bu etkinin ölçme anlarındaki karşılıklarının hesaplanması amacıyla “solide.m” bir enterpolasyon altprogramı hazırlanmıştır.

Verilerin programa tanıtılmasından sonra hesaplama ve analiz işlemlerine geçilmiştir. Hesaplama çalışmaları 120 ölçme ile sınırlandırmıştır. Analiz yapılan her çalışma gününe ait veriler temin edilerek yukarıda belirtilen uygulamalar her analiz günü için yeniden düzenlenerek çalışma verileri programa eklenmiştir.

Easy3 olarak isimlendirilen programda olmayıp tez çalışmasını gerçekleştirebilmek amacıyla ana programa yapılan diğer eklemeler aşağıda listelenmiştir;

- IGS SP3 verisinde saat düzeltmesi hesaplanmamış olan uyduların işleme katılmasını engellemek için ana programa ekleme yapılmıştır. Yapılan ekleme ile IGS verisinden saat düzeltmeleri hesaplanmamış olan uyduların RINEX verilerinden de silinerek hesaplamalarda işleme girmesi engellenmiştir. Hatalı SP3 verilerinin tespiti Şekil 4.3’de gösterilmiştir.
- Uydu elevasyon açısı 10° ’den küçük olan uyduların işleme katılmaması için düzenleme yapılmıştır. Böylece yükseklik açısı ölçü anında 10° ’den küçük olan uyduların da işleme girmesi engellenmiştir.

Hatalı verilerin hesaba katılması engellendikten sonra tek frekanslı kod gözlemleri kullanılarak elde edilen sonuçların karşılaştırılması için ayrıca “Kod Gözlemi Düzeltmesi” için de program geliştirilmiştir. Bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için “prsmoot.m” olarak isimlendirilen program yazılmıştır. Bu programın içinde detayları Bölüm 2.3 de belirtilen formüller ile kod ölçülerine faz ölçülerinden yararlanılarak düzeltme getirilmiştir.

Analiz çalışmasının gerçekleştirildiği günlere ait SP3 verilerindeki hatalı saat verileri olan uydular da tespit edilerek bu uydulardan elde edilen verilerin hesaplamaya girmesi engellenmiştir (Şekil 4.3).

Bu çalışma çerçevesinde hazırlanan alt programlardan olan “Satclk_pre.m” programında SP3 verisinden alınan uydu saat verilerinin işleme alınması için enterpolasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. “Satpos1.m” programında rölativistik etki RINEX navigasyon verisinden elde edilen bilgiler doğrultusunda

hesaplatılmıştır. Ayrıca “Satpos_pre.m” programı yardımıyla da SP3 verisinden interpolasyon yapmak suretiyle uydu konum bilgileri hesaplatılmıştır.

*	2011	2	1	0	30	0.00000000														
PG01	4554.494036	-24392.730918	-9390.519642	999999.999999																
PG02	12666.450139	23271.630744	4176.811007	317.869621	9	9	9	127												
PG03	-13313.563748	-12438.188459	-19828.138080	999999.999999																
PG04	3065.003740	22293.136778	13620.035453	23.568794	6	9	7	112												
PG05	6058.846680	17878.079713	-18660.989851	-107.682653	6	7	6	124												
PG06	-8419.342399	-14255.657533	-20640.887787	999999.999999																
PG07	-13032.859187	7357.210416	-21941.386647	2.780409	9	9	6	139												
PG08	-5292.742853	16661.332004	-19791.316846	7.310085	7	8	5	117												
PG09	19345.772452	11886.570348	13245.701033	58.976860	6	9	5	128												
PG10	-6189.323232	24465.635642	-7846.449439	-64.959035	6	6	10	127												
PG11	-22736.429525	-7888.307432	11284.996419	-123.676693	8	10	6	135												
PG12	15117.425376	2729.164646	21683.113754	-30.856172	7	8	6	118												
PG13	-24391.177434	5795.912124	-8978.454607	284.003403	9	7	9	131												
PG14	9742.515328	-13867.935549	20570.593818	128.057216	5	8	6	138												
PG15	24817.602411	4006.190117	-8798.265328	-155.740106	8	6	8	123												
PG16	-2521.749129	-20076.541323	-17017.721826	-147.139842	8	9	7	102												
PG17	-11076.752607	14192.618955	19574.533298	182.516331	10	8	6	105												
PG18	16409.265846	-18741.557231	-8368.078367	119.049337	8	9	9	108												
PG19	-22297.800009	-8569.699391	-11954.642142	-106.860377	9	9	11	121												
PG20	-17307.870939	3099.200058	19742.113189	48.701999	8	8	9	104												
PG21	13326.311312	-8242.467016	-21069.921259	-120.725068	8	7	6	144												
PG22	10502.409893	-24248.865677	2266.455047	154.117719	8	6	7	102												
PG23	-26570.819471	-389.354761	2999.117661	328.779810	9	5	8	139												
PG24	-19177.030754	-9825.694217	15760.093516	361.452611	4	9	7	139												
PG25	17588.745680	-13139.704026	14932.267680	-66.324634	7	6	9	136												
PG26	15028.552305	12378.585367	-18835.830725	-109.981652	10	8	12	129												

Şekil 4.3. IGS Saat Düzeltmesi Hesaplanmamış Uyduların Tespiti

Block IIA ve Block IIR uydularına uydu anteni faz merkezi hatasının giderilmesi için gerekli olan düzeltme parametreleri programın bu bölümünde eklenmiştir. Uydu anteni faz merkezi hatasının giderilmesinde kullanılan değerler ise Bölüm 3.7’de anlatılmıştır.

```
Xoff_II_IIA=[0.2794 0 1.0259];
Xoff_IIR=[0 0 1.2053];
Xoff_IIF=[0 0 0];
r1=sqrt(X(1)^2+X(2)^2+X(3)^2);
ez1=(-1/r1)*[X(1) X(2) X(3)];
if
(n==32|n==24|n==26|n==27|n==9|n==4|n==6|n==3|n==10|n==30|n==8)
    dr=norm(Xoff_II_IIA*ez1');
elseif (n==25)
    dr=norm(Xoff_IIF*ez1');
else
    dr=norm(Xoff_IIR*ez1');
end
```

Sekil 4.4. Uydu Anteni Faz Merkezi Hatası Düzeltmesi

Atmosferik etkilerin giderilmesi için “ion.m” ve “trop.m” isimli programlar bu çalışmaya eklenmiştir. İyonosferik etkilerin giderilmesi için çalışma gününe ait navigasyon dosyasının içinde bulunan parametrelerden yararlanılmıştır.

Tablo 4.2’de gösterilen parametreler “ion.m” programı içinde kullanılarak detayları bölüm 3.3’de anlatılan “Broadcast İyonosferik Model” yardımıyla iyonosferik etkiler giderilmiştir.

Tablo 4.2. Rinex Navigasyon Mesajında Bulunan İyonosfer Modellemesi İçin Kullanılan Parametreler

8.3819D-09	-7.4506D-09	-5.9605D-08	5.9605D-08	ION ALPHA
8.8064D+04	-3.2768D+04	-1.9661D+05	1.9661D+05	ION BETA

Troposfer etkisinin giderilmesi için de “trop.m” olarak isimlendirilen programdan yararlanılmıştır. Troposferik gecikme hesabında kullanılan atmosferik parametreler standart troposferik modellerden yararlanılarak elde edilmektedir. Bu çalışmada; detayları Bölüm 3.4’de anlatılan “Saastamoinen Troposferik Model” model kullanılmıştır.

Bu düzeltmeler sonucunda “reco_ls4pre.m” olarak isimlendirilen programda alıcı koordinatları hesaplanmıştır. Ana programda katı yer yuvarı etkisinin de programa eklenmesi için öncelikli olarak Şekil 4.1’de gösterilen dakika da bir hesaplatılan katı yer yuvarı etkilerinin polinom enterpolasyon yöntemi ile 30 saniye aralıklı epoklara eklenmesi için hesaplama işleminde “solid_add.m” isimli alt programla gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.5’de gösterildiği üzere “reco_ls4pre.m” isimli programdan gelen alıcı koordinat değerleri “pos” olarak isimlendirilmiştir. Solide_add.m isimli yardımcı program ile de time1 olarak isimlendirilen ölçü yapılan epoklara ait GPS zamanı verileri kullanılarak enterpolasyon yapılmıştır. Böylece, RINEX verilerindeki gibi 30 saniye aralıklar ile katı yer yuvarı etkileri belirlenerek 24 saatlik tüm veri her epok için sonuca eklenmiştir.

Katı yer yuvarı etkilerinin Şekil 4.5’de gösterildiği gibi hesaplanan alıcı koordinatlarına eklenmesi alıcı koordinatları hesaplanmıştır.

```
% solid earth tide programa eklenmesi
[Q]=solide_add(time1,cfX,cfY,cfZ,mx,my,mz)
pos=pos(1:3,:)+Q'
```

Şekil 4.5. Katı Yer Yuvarı Etkisinin Hesaplanan Alıcı Koordinatlarına Eklenmesi

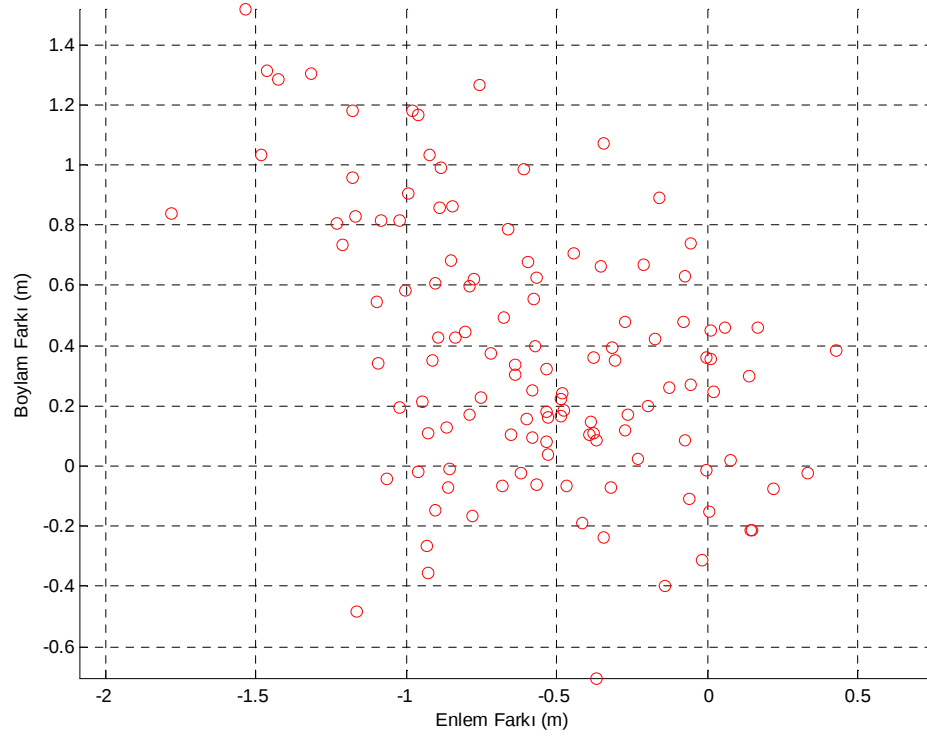
4.3 Analiz Sonuçları

Analiz çalışması üç farklı güne ait veriler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Uygulama 01 Şubat 2011, 17 Mart 2011 ve 30 Nisan 2011 tarihlerine ait RINEX ve SP3 verileri kullanılarak gerçekleştirilmiş ve sonuçları irdelenmiştir.

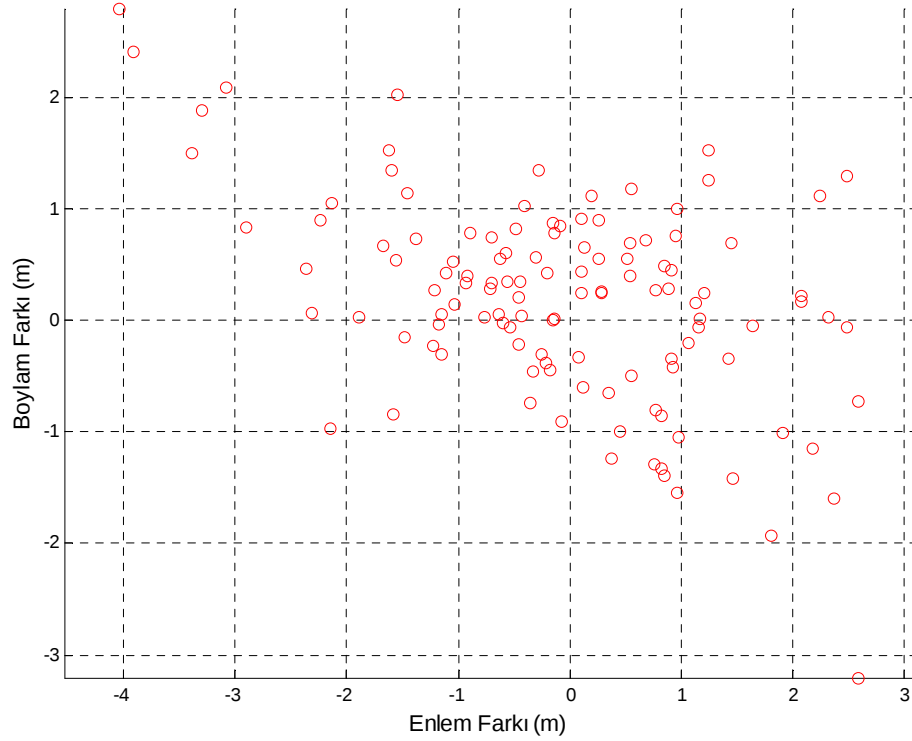
Öncelikle yukarıda belirtilen günlere ait katı yer yuvarı hareketleri bölüm 4.1’de anlatıldığı gibi hesaplattırılmıştır. Bu aşamadan sonra analizlerin gerçekleştirileceği günlerde SP3 verilerinde saat hataları hesaplanmamış olan uydular tespit edilmiştir. Bu uyduların çalışma günlerine ait verilerden silinmesi için programa düzenlemeler yapılarak analiz çalışmalarına geçilmiştir.

Tek frekanslı GPS alıcıları ile hassas konum belirleme üzerine gerçekleştirilen analiz çalışmalarının sonuçları yukarıda belirtilen günler de 1 saat (120 epok)’lık çözümler ile elde edilmiştir. Bölüm 3’de detaylı bir şekilde belirtilen hassas konum belirleme çalışmasında dikkat edilmesi gereken etkilerden hassas efemeris verilerinin kullanılması, iyonosfer ve troposfer etkileri, yer yuvarı etkileri, uydu anteni faz merkezi hataları gibi hata ve etkilerin dikkate alınarak gerçekleştirildiği 01 Şubat 2011 çözümlerin sonuçları ise Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de görülmektedir.

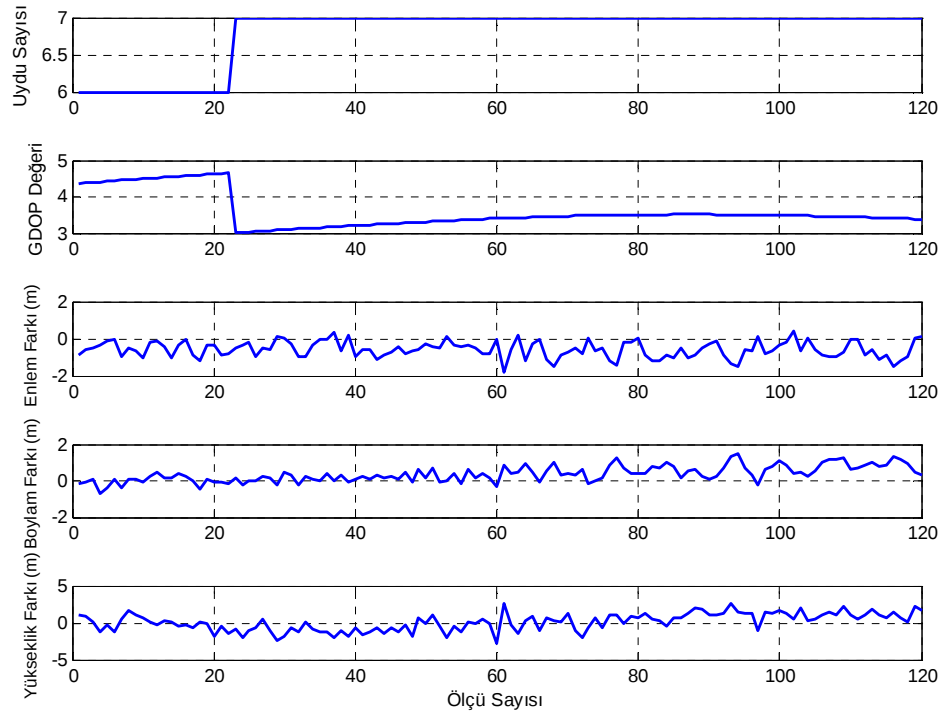
İlk analiz çalışması olan 1 Şubat 2011 tarihli verilerin hesaplama sonuçlarından da görüleceği gibi hassas efemeris verisi kullanarak tek ve çift frekans kullanılarak gerçekleştirilen çözümlerde elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.6’de tek frekans kullanılarak elde edilen sonuçların ölçü noktasının kesin koordinatlarından farkları gösterilmektedir. Şekil 4.7’de ise çift frekans kullanılarak elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 ise bu çözümlere ait detaylı analiz sonuçlarını içermektedir.



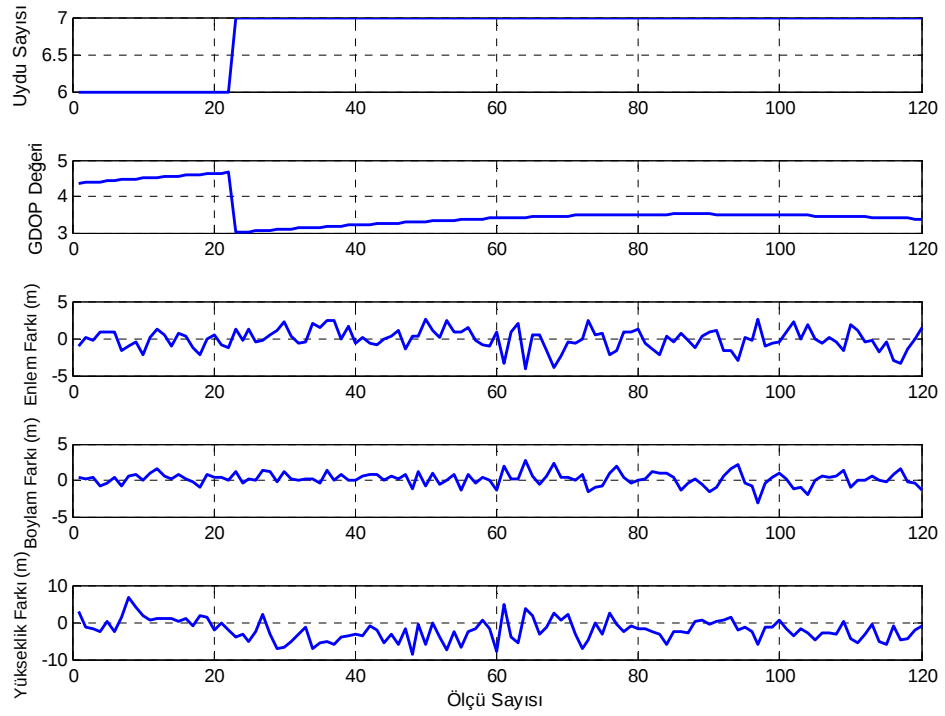
Şekil 4.6. Tek Frekanslı Çözüm Sonucu (01 Şubat 2011)



Şekil 4.7 Çift Frekanslı Çözüm Sonucu (01 Şubat 2011)



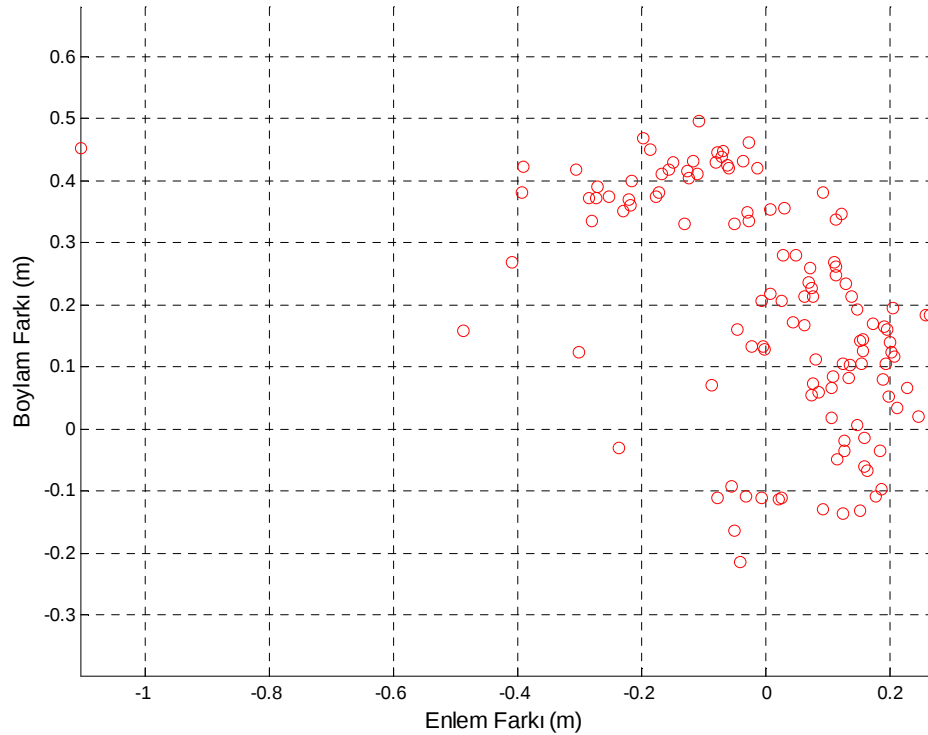
Şekil 4.8. Tek Frekans Kullanılarak ile Elde Edilen Sonuçlar



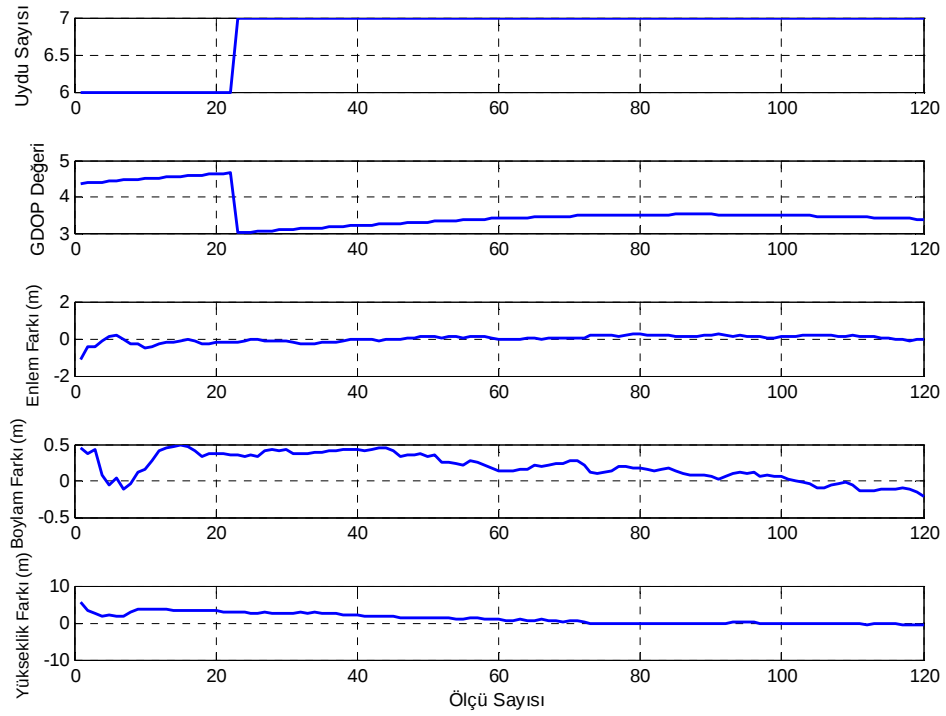
Şekil 4.2. Çift Frekans Kullanılarak ile Elde Edilen Sonuçlar

Bu aşamadan sonra tek frekanslı GPS alıcısı kullanılarak elde edilen sonuçların detayları bölüm 2.3’de anlatılan ölçülere kod gözlemi düzeltmesi getirilerek hesaplanmasıyla elde edilen sonuçlar ile de karşılaştırılmasının yapılması için çözümler tekrarlanmıştır. Bu karşılaştırmayı yapabilmek için “prsmooth.m” isimli MATLAB yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılım yardımıyla kod ölçülerinden elde edilen geometrik uzunluğa (pseudorange) faz ölçüleri kullanılarak düzeltme (code pseudorange smoothing) getirilmiştir. Bu program ile çift frekanslı alıcılar için bölüm 2.3’de detaylı olarak ele alınan kod gözlemi düzeltmesi işlemi ve bölüm 2.4’de detayları belirtilen hassas konum belirleme işleminde uygulanması gereken formüller birlikte işleme alınmıştır.

Ayrıca kod düzeltmesi yardımıyla elde edilen sonuçlar detaylı olarak Şekil 4.11’de gösterilmiştir. 1 Şubat 2011 tarihinde elde edilen veriler üzerinde gerçekleştirilen analiz sonuçlarının karşılaştırması ise Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

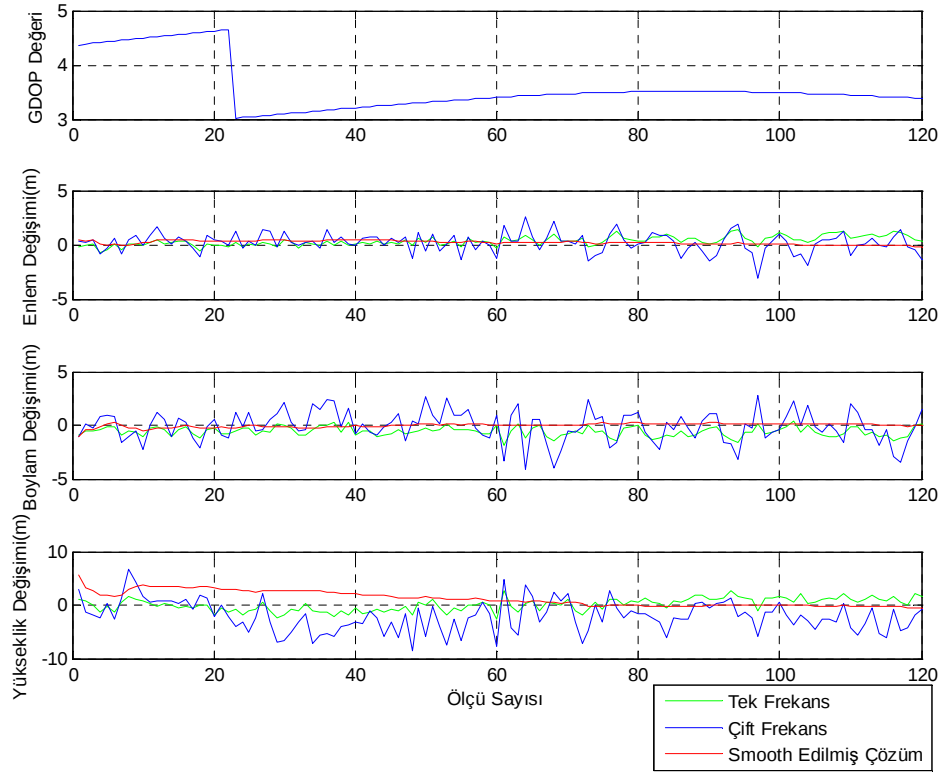


Şekil 4.10. Kod Düzeltmesi İşlemi Sonucu Elde Edilen Analiz Sonucu
(01 Şubat 2011)



Şekil 4.11. Kod Düzeltmesi İşlemi Sonucu Elde Edilen Detaylı Analiz Sonucu

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’den de görüldüğü gibi kod gözlemi düzeltmesi uygulanarak elde edilen sonuçların doğruluğunun diğerlerinden daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Ancak tek frekanslı GPS alıcıları kullanarak da elde edilen sonucun doğruluğunun oldukça iyi olduğu belirlenmiştir. Çözüm yönteminin incelenmesi amacıyla ve farklı tarihlerde elde edilen veriler ile de hazırlanan yazılımı test etmek için 17 Mart 2011 ve 30 Nisan 2011 tarihli veriler kullanılarak da çözüm gerçekleştirilmiştir. Tablo 4.3, Tablo 4.4 ve Tablo 4.5’de ise gerçekleştirilen analizin sayısal sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 4.12. 01 Şubat 2011 Tarihli Sonuçların Karşılaştırılması

Tablo 4.3. Tek Frekanslı Çözüm İle Elde Edilen Sayısal Değerler

Tek Frekans Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar (m)			
	Enlem	Boylam	Yükseklik
Sonuçların Ortalaması	-0.579	0.367	0.085
Karesel Ortalama Hata	0.442	0.436	1.174
Koordinat Değişim Aralığı	2.208	2.224	5.271

Tablo 4.4. Çift Frekanslı Çözüm İle Elde Edilen Sayısal Sonuçlar

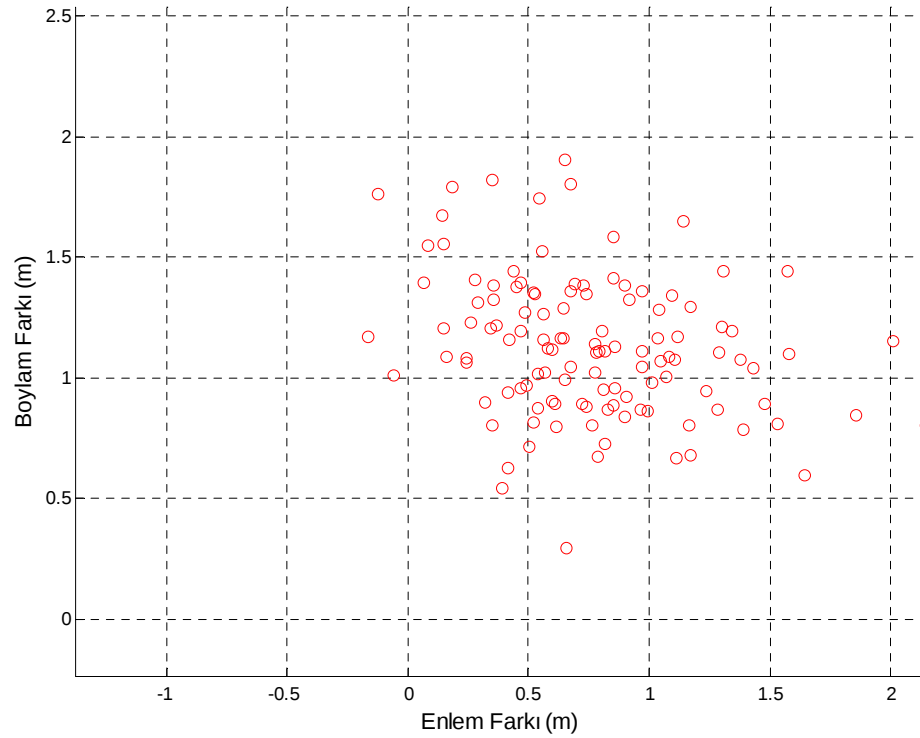
Çift Frekanslı Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar (m)			
	Enlem	Boylam	Yükseklik
Sonuçların Ortalaması	-0.087	0.188	-2.083
Karesel Ortalama Hata	1.405	0.910	2.879
Koordinat Değişim Aralığı	6.634	6.002	15.170

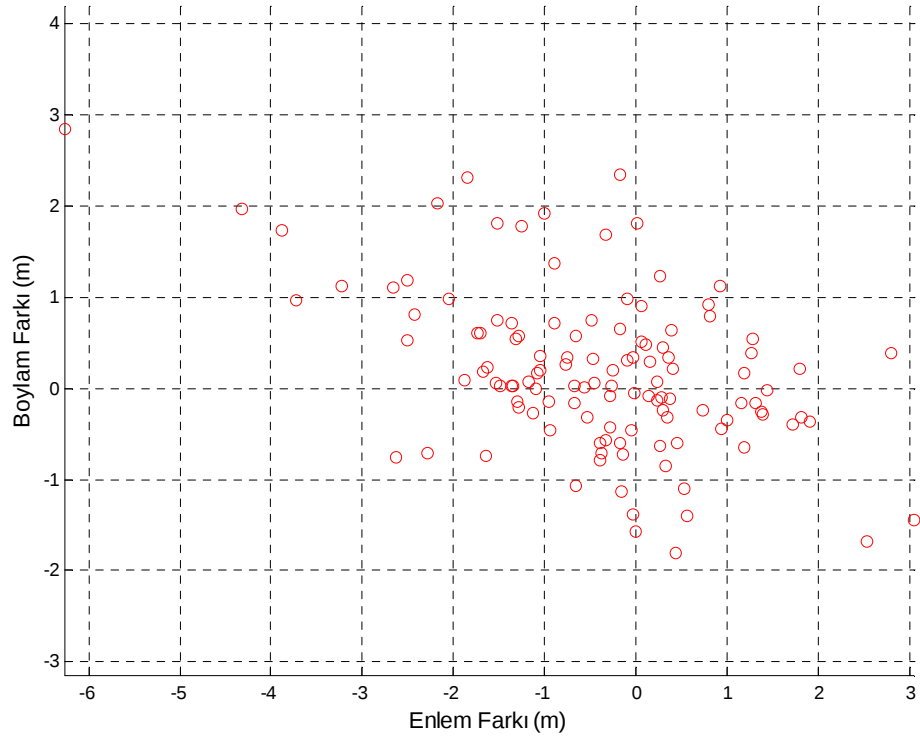
Tablo 4.5. Kod Düzeltmesi Getirilerek Elde Edilen Sonuçlar

Kod Düzeltmesi (Smooth) Uygulanarak Elde Edilen Sonuçlar (m)			
	Enlem	Boylam	Yükseklik
Sonuçların Ortalaması	-0.004	0.196	1.167
Karesel Ortalama Hata	0.193	0.184	1.380
Koordinat Değişim Aralığı	1.367	0.710	6.078

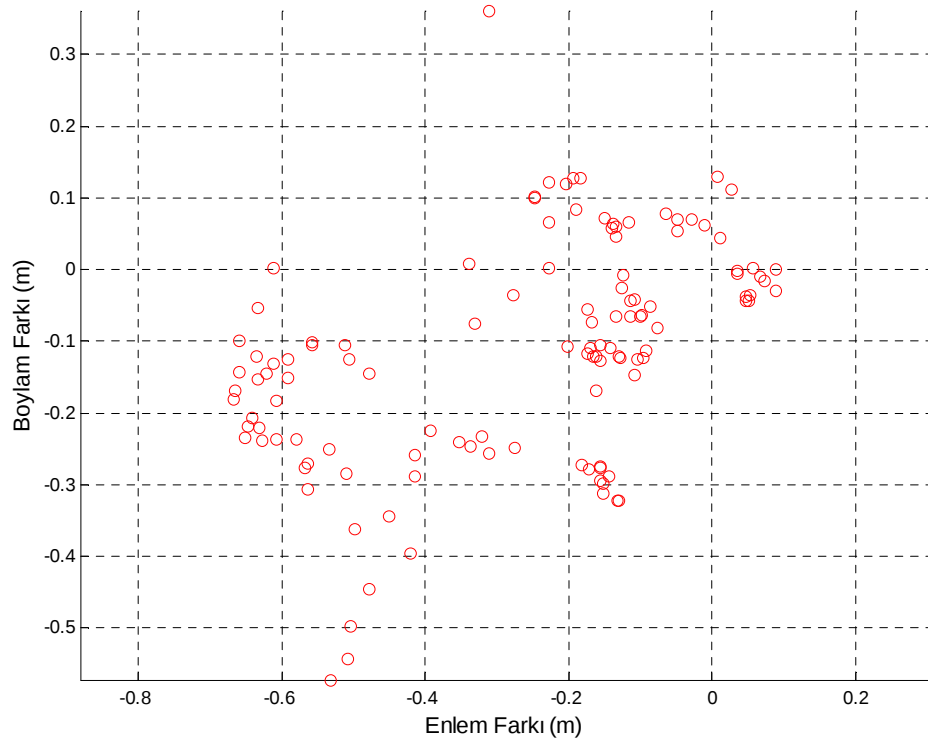
01 Şubat 2011 tarihli veriler ile gerçekleştirilen çözüm sonuçları yukarıdaki tablolarda listelenmiştir.

Şekil 4.13, Şekil 4.14 ve Şekil 4.15’de 17 Mart 2011 tarihli verilerin 120 ölçü için değerlendirilmesi ile elde edilen çözüm sonuçlarının kesin koordinat değerlerinden farkları gösterilmiştir.

**Şekil 4.3.** 17 Mart 2011 Tarihli Verinin Tek Frekans Kullanılarak Çözümü



Şekil 4.4. 17 Mart 2011 Tarihli Verinin Çift Frekans Kullanılarak Çözümü



Şekil 4.5. 17 Mart 2011 Tarihli Verinin Kod Düzeltmesi Getirilerek Elde Edilen Çözümü

Tablo 4.6. 17 Mart 2011 Tarihli Verinden Tek Frekans Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar

Tek Frekans Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar (m)			
	Enlem	Boylam	Yükseklik
Sonuçların Ortalaması	0.743	1.137	-0.556
Karesel Ortalama Hata	0.478	0.303	0.909
Koordinat Değişim Aralığı	3.516	1.710	5.869

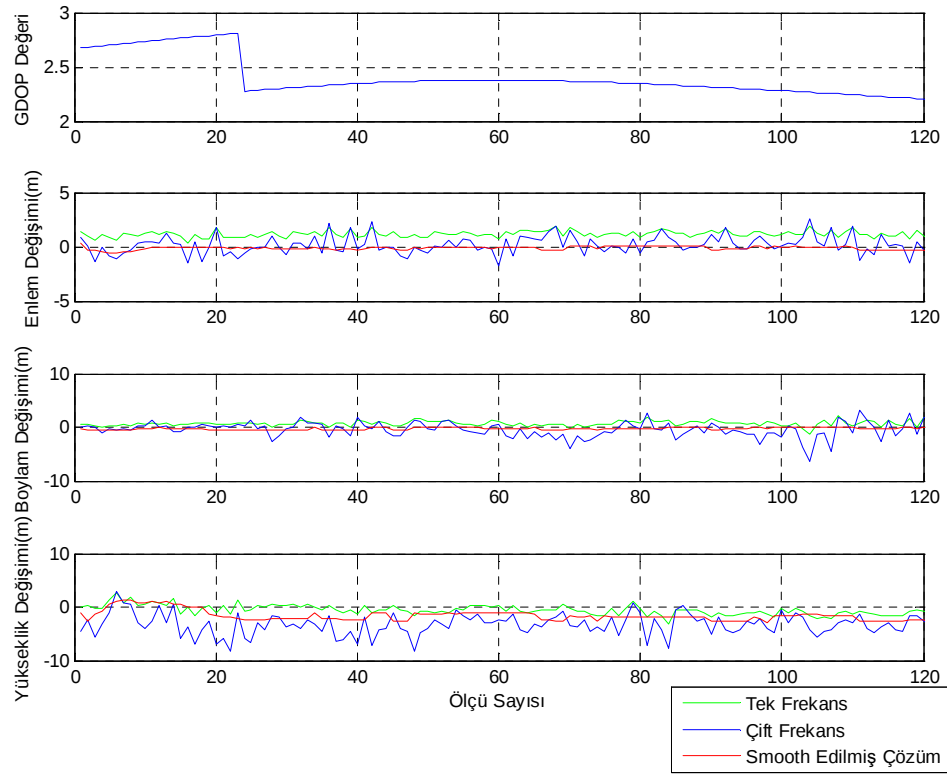
Tablo 4.7. 17 Mart 2011 Tarihli Verinden Çift Frekans Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar

Çift Frekans Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar (m)			
	Enlem	Boylam	Yükseklik
Sonuçların Ortalaması	-0.436	0.186	-3.286
Karesel Ortalama Hata	1.422	0.870	2.008
Koordinat Değişim Aralığı	9.311	4.640	11.240

Tablo 4.8. 17 Mart 2011 Tarihli Verinden Kod Düzeltmesi Getirilerek Elde Edilen Sonuçlar

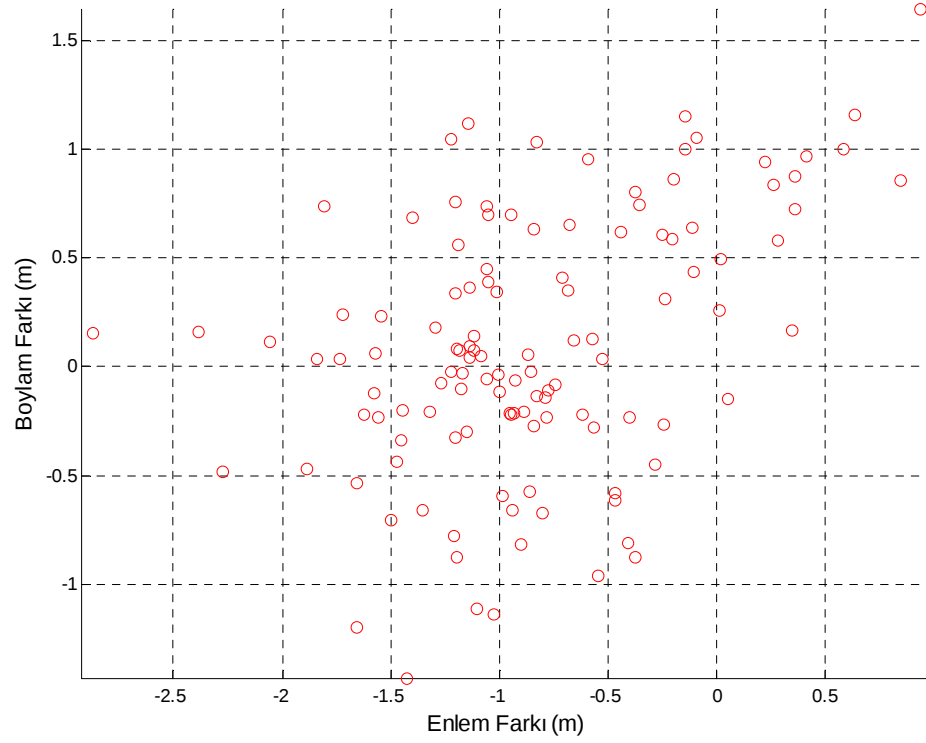
Kod Düzeltmesi (Smooth) Uygulanarak Elde Edilen Sonuçlar (m)			
	Enlem	Boylam	Yükseklik
Sonuçların Ortalaması	-0.273	-0.116	-1.585
Karesel Ortalama Hata	0.229	0.155	1.014
Koordinat Değişim Aralığı	0.756	0.934	4.267

17 Mart Tarihli veriler ile elde edilen çözüm sonuçlarının karşılaştırılması ise Şekil 4.16'da verilmektedir.

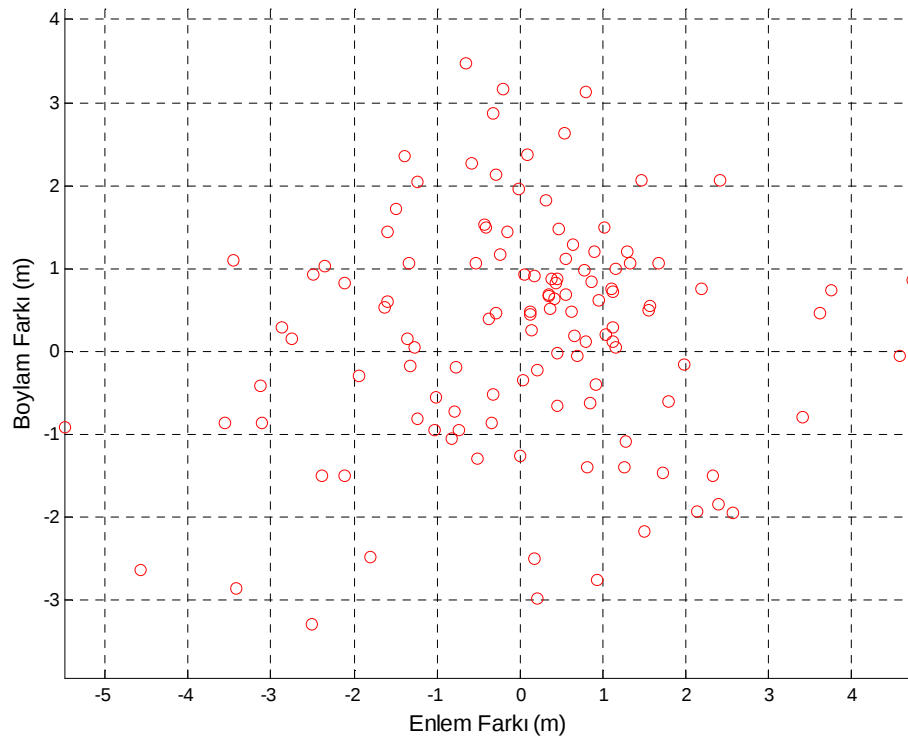


Şekil 4.6. 17 Mart 2011 Tarihli Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

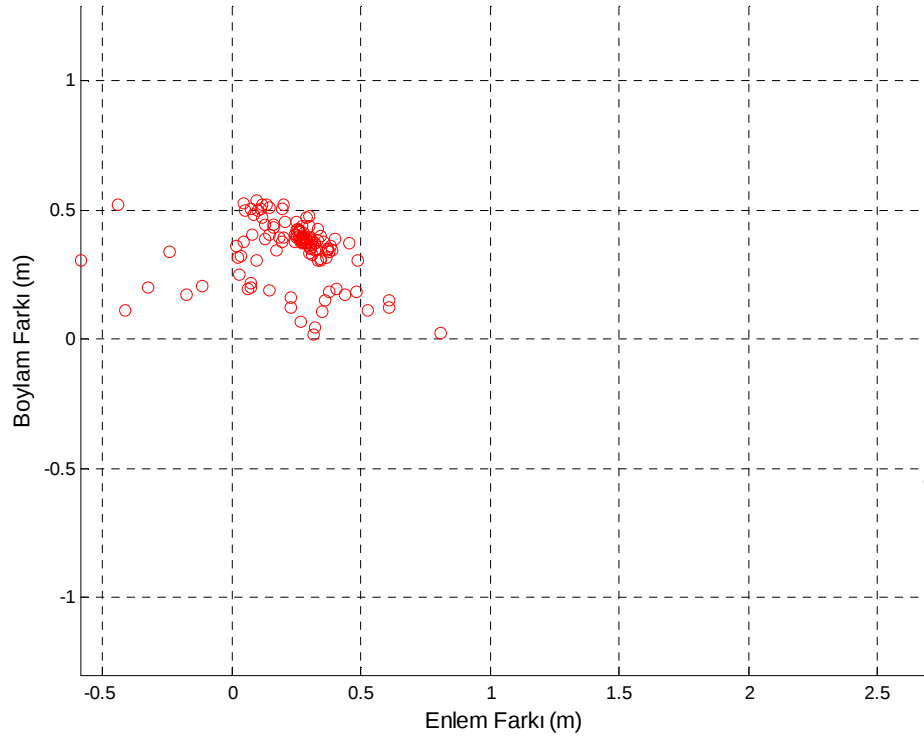
Son olarak da 30 Nisan 2011 tarihli veriler SOPAC arşivlerinden temin edilerek analiz çalışmasında kullanılmıştır. 30 Nisan Tarihli verilerin kullanılarak elde edildiği koordinat değerlerinin kesin koordinatlardan farkları ise aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



Şekil 4.17. 30 Nisan 2011 Tarihli Verinin Tek Frekans Kullanılarak Elde Edilen Çözümü



Şekil 4.18. 30 Nisan 2011 Tarihli Verinin Çift Frekans Kullanılarak Çözümü



Şekil 4.19. 30 Nisan 2011 Tarihli Verinin Kod Düzeltmesi Uygulanarak Çözümü

Tablo 4.9. 30 Nisan 2011 Tarihli Verinin Tek Frekans İle Elde Edilen Çözüm Sonuçları

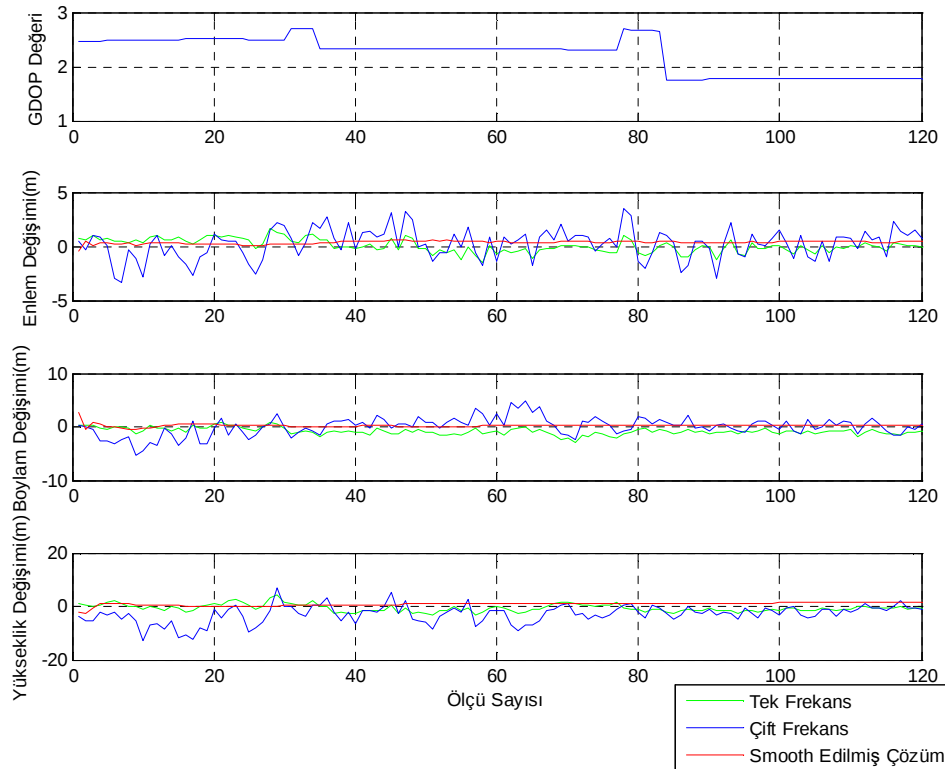
Tek Frekans Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar (m)			
	Enlem	Boylam	Yükseklik
Sonuçların Ortalaması	-0.849	0.096	-0.566
Karesel Ortalama Hata	0.668	0.596	1.388
Koordinat Değişim Aralığı	3.803	3.081	7.208

Tablo 4.10. 30 Nisan 2011 Tarihli Verinin Çift Frekans İle Elde Edilen Çözüm Sonuçları

Çift Frekans Kullanılarak Elde Edilen Sonuçlar (m)			
	Enlem	Boylam	Yükseklik
Sonuçların Ortalaması	0.032	0.221	-2.899
Karesel Ortalama Hata	1.733	1.379	3.339
Koordinat Değişim Aralığı	10.250	6.775	19.700

Tablo 4.11. 30 Nisan 2011 Tarihli Verinin Kod Düzeltmesi Uygulanarak Elde Edilen Çözüm Sonuçları

Kod Düzeltmesi (Smooth) Uygulanarak Elde Edilen Sonuçlar (m)			
	Enlem	Boylam	Yükseklik
Sonuçların Ortalaması	0.249	0.341	0.848
Karesel Ortalama Hata	0.296	0.143	0.655
Koordinat Değişim Aralığı	3.288	1.084	4.078



Şekil 4.7. 30 Nisan 2011 Tarihli Verilerin Çözüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

Üç farklı günde gerçekleştirilen analiz sonuçlarında ortaya çıkan sonuca göre tek frekanslı tek GPS alıcısı ile gerçekleştirilen çözümlerde mutlaka Hassas IGS yörünge (SP3) verileri ile GPS hata ve etkileri dikkate alınmalıdır. Tek frekans Kullanılarak elde edilen çözüm sonuçları incelendiğinde standart sapmalarının düşük olduğu ancak maksimum ve minimum koordinat farklarının ise yüksek çıktığı görülmüştür. Çift Frekans Kullanılarak elde edilen çözümlerin ise standart sapmalarının tek frekanslı uygulamalara göre yüksek olduğu ancak maksimum ve minimum koordinat değişim aralığının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Sonuçların Karşılaştırılması amacıyla Bölüm 2.3 de anlatılan kod gözlemi düzeltmesi uygulanarak elde edilen sonuçların ile hassasiyetinin 30 cm civarında olduğu tespit edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Gerçekleştirilen tek frekanslı tek bir GPS alıcısı ile hassas konum belirleme çalışmasında uydu konumlarının hassas olarak hesaplanabilmesi için Hassas Efemeris (SP3) verilerinden yararlanılmıştır. Kod gözlemi yardımıyla gerçekleştirilen çalışmada alıcı koordinatlarının hassas olarak hesaplanabilmesi amacıyla uydu saat hataları, iyonosfer etkisi, troposfer etkisi, uydu anteni faz merkezi hatası, katı yeryuvarı etkisi gibi etki ve hatalar dikkate alınarak 01 Şubat 2011, 17 Mart 2011 ve 30 Nisan 2011 tarihlerinde 120 epok için analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 4’de gerçekleştirilen uygulamaların sonuç çıktılarından anlaşılabacağı gibi tek frekanslı GPS alıcıları ile hassas sonuç elde edilmek isteniyorsa mutlaka SP3 Hassas Efemeris verisinin kullanılmasının hassas koordinat bilgi elde etmede oldukça önemli olduğu belirlenmiştir. Ayrıca Bölüm 3’de detaylı olarak anlatılan GPS ile gerçekleştirilen çalışmalarda sonuçlara etki eden hata kaynaklarının da mutlaka dikkate alınması gerekmektedir.

Tek Frekanslı GPS alıcısı kullanılarak elde edilen çözüm sonuçlarının koordinat değerlerinin Karesel ortalama hatasının; Enlem değerleri için $\pm 44\text{cm}$ ile $\pm 66\text{cm}$ arası, boylam değerleri için $\pm 30\text{cm}$ ile $\pm 60\text{cm}$ arası ve yükseklik değerleri için de $\pm 90\text{cm}$ ile $\pm 140\text{cm}$ arasında olduğu tespit edilmiştir. Karşılaştırma amacıyla çalışma yazılımına eklenen kod gözlemi düzeltmesi ile elde edilen sonuçların karesel ortalama hatalarının enlem ve boylam değerleri için anlamlı bir şekilde iyileştiği tespit edilmiştir. Enlem değerlerinin karesel ortalama hatası $\pm 19\text{cm}$ ile $\pm 30\text{cm}$ arasında boylam değerlerinin karesel ortalama hatası $\pm 14\text{cm}$ ile $\pm 18\text{cm}$ arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak; Tek frekanslı tek bir GPS alıcı kullanılarak kod ölçüleri ile gerçekleştirilen çalışmalarda mutlaka Hassas Efemeris (SP3) Yörünge verileri ve ölçülere etki eden hata kaynakları dikkate alınması gerektiği yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir. PPP yönteminin uygulama kolaylığı, tek alıcı kullanılarak konum belirlenebilmesi ve buna bağlı olarak arazi maliyetinin düşmesi ve sağladığı

doğruluk nedeniyle diferansiyel ölçme yöntemine ciddi bir alternatif olacağı düşünülmektedir.

Tek Frekanslı Tek GPS alıcısı kullanılarak hassas konum belirleme üzerine gerçekleştirilen bu çalışmada ayrıca Bölüm 3 de detayları belirtilen GPS hata ve etkilerinden yer yuvarı dönme parametreleri, kutup gezinmesi etkisi, okyanus yüklemesi etkisi ve istasyon hızlarının etkisi dikkate alınmamıştır. İleride gerçekleştirilecek çalışmalarda bu etkilerinde dikkate alınması ile elde edilecek sonuçların doğruluklarının daha da artacağı tahmin edilmektedir.

KAYNAKLAR

Adhika, B., Hatch Filter : GPS Dual Frequency Smoothing

<http://www.scribd.com/doc/32484362/GPS-Dual-Frequency-Smoothing>,

23.02.2011

Alkan, R., M. ve Kalkan, Y., Precise Point Positioning – PPP (Hassas Nokta

Konumlama) Tekniğinin Hidrografik Ölçmelerde Kullanılabilirliği, TMMOB

Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası 13. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik

Kurultayı 18-22 Nisan 2011

Block II Satellite Information,

<ftp://tycho.usno.navy.mil/pub/gps/gpsb2.txt>, 03.01.2011

Chen, H.S., Wang, L.S., Long-Duration-Carrier-Smoothed-Code

Algorithm for GPS Positioning, National Taiwan University, Taipei, Taiwan,

R.O.C Position, Location and Navigation Symposium, IEEE 2000,

<http://ntur.lib.ntu.edu.tw/bitstream/246246/2007041910021530/1/00838291.pdf>,

23.02.2011

Dick, R. W. And Richter B. (eds.), IERS Annual Report (2007),

<http://www.iers.org/iers/EN/Publications/AnnualReports/AnnualReports.html>,

23.02.2011

Eckl, C. M., Snay A. R., Soler T., M. W. Cline, Mader, L. G., Accuracy of

GPS- Derived Relative Positions as a Function of Interstation Distance and

Observing Duration, Journal of Geodesy 75:633-640, 2001

<http://www.ngs.noaa.gov/CORS/Articles/Accuracy.pdf>, 03.03.2011

El-Rabbany, A., Introduction to GPS, The Global Positioning System, Artech House,

Boston – London, 2002

- Erdoğan, S., Güllü, M., Baybura, T., Tiryakioğlu, İ., Global Konum Belirlemede Hata Kaynakları, Teknolojik Araştırmalar, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2005,
http://www.teknolojikarastirmalar.com/pdf/tr/03_010205_6_Erdogan_S_tr.pdf,
 03.04.2010
- Hofmann, B., Lichtenegger, H., Wasle, E., GNSS – Global Navigation Satellite Systems, Springer Wien NewYork, USA, 2007
- International GNSS Services, <http://igscb.jpl.nasa.gov/>, 07.10.2010
- Gao Y., What is precise point positioning (PPP) and what are its requirements, advantages and challenges? In: GNSS Solutions: Inside GNSS, 16-18 November – December 2006,
<http://www.insidegnss.com/auto/NovDec06GNSSolutions.pdf>, 07.10.2010
- Kahveci, M., Yıldız, F., GPS/GNNS Uydu Konum Belirleme Sistemleri Teori – Uygulama, Nobel Yayınları, 4.Baskı, Kasım 2009
- Kahveci, M., GPS/GNSS Gözlemlerini Değerlendirme Yöntemlerinde Son Gelişmeler, HKM Jeodezi, Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi Dergisi 2010/1 Sayı 102
- Kai Borre, Easy 3, <http://kom.aau.dk/~borre/easy/> , 12.03.2010
- Koçak, M. G., GPS Sabit İstasyonlarında Zaman Serileri Analizi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2004
- Kouba, J., Heroux, P., Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products, GPS Solution. Vol.5, pp. 2-28, 2001
- Kouba, J., A Guide to using International GNSS Service (IGS) Products, Geodetic Survey Division, Natural Resources Canada, May 2009
<http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/resource/pubs/GuideToUsingIGSProducts.pdf>

Schmid, R., Rothacher, M., Thaller, D., Steigenberger, P., Absolute Phase Center Corrections of Satellite and Receiver Antennas, 2005

Sopac Data Archive, <http://sopac.ucsd.edu/dataArchive> , 2010-2011

McCarthy, D. D. and Petit, G. (eds.), IERS Conventions (2003), IERS Technical Note 32.
<http://www.iers.org/ IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/TechnicalNotes.html>,
23.02.2011

Mondali, Single Point Positioning Using Low Cost Single Frequency GPS Receiver, Universiti Teknologi Malaysia, November 2005

Milbert, D., Solid Earth Tide,
<http://home.comcast.net/~dmilbert/softs/solid.htm#link0>, 12.04.2011

NASA JPL, <http://www.jpl.nasa.gov/>, 12.10.2010

NOAA CORS, <http://www.ngs.noaa.gov/CORS/>, 23.04.2011

National Geodetic Survey RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11, <http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/rinex211.txt>,
05.11.2008

National Geodetic Survey Standard GPS Format SP3,
http://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/data/format/sp3_docu.txt, 12.10.2010

Petit, G. and Luzum, B. (eds.), IERS Conventions (2010), IERS Technical Note 36.
<http://www.iers.org/ IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/TechnicalNotes.html>,
23.02.2011

Tekiç, S., Accuracy of GPS Precise Point Positioning (PPP), Master of Science Thesis, Graduate Program in Geodesy Boğaziçi University, 2009

Tıǒlı, C., GPS (Küresel Konumlama Sistemi) Yapısı, Ölçme Sistemi ve Hata Kaynakları Üzerine Bir İnceleme, CBÜ Soma Meslek Yüksek Okulu Teknik Bilimler Dergisi Cilt:1 Sayı:11, 2009

Tirkakioǒlu, İ., Güllü, M., Baybura, T., Erdoğan, S., GPS Sinyal Yansımasının (Multipath) Nokta Konumlarına Etkisinin Araştırılması, 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu (534sf-543sf), 23 – 25 Kasım 2005, İTÜ

Witchayangkoon, B., Elements of GPS Precise Point Positioning, Doctor of Philosophy, Thesis The University of Maine, Orono, USA, December 2000

Xu, G., GPS Theory, Algorithms and Application, Springer, 2nd Edition, 2007

Zumberge, J.F., M. M. Watkins, and F. H. Webb. 1997. Characteristics and Application of Precise GPS Clock Solutions Every 30 Seconds.
<http://trs-new.jpl.nasa.gov/dspace/bitstream/2014/22369/1/97-0852.pdf>,
23.11.2010

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Bulgaristan'ın Kırcaali ilinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Bursa ilinde tamamladı. 2007 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2008 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği bölümünde yüksek lisans eğitime başladı. 2009 yılında Bursa Büyükşehir Belediyesinde Harita Mühendisi olarak göre başlamış olup halen bu görevini sürdürmektedir.

Bilgin MUTLU