T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GPS HASSAS MUTLAK KONUM BELİRLEMEDE TAMSAYI BELİRSİZLİĞİ ÇÖZÜMLERİNİN İNCELENMESİ

Furkan KARLITEPE

DOKTORA TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Programı

Danışman

Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN

Kasım, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GPS HASSAS MUTLAK KONUM BELİRLEMEDE TAMSAYI BELİRSİZLİĞİ ÇÖZÜMLERİNİN İNCELENMESİ

Furkan KARLITEPE tarafından hazırlanan tez çalışması 24.11.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Geomatik Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Taylan ÖCALAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Deniz ÖZ DEMİR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Rahmi Nurhan ÇELİK, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Mustafa Tevfik ÖZLÜDEMİR, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "GPS HASSAS MUTLAK KONUM BELİRLEMEDE TAMSAYI BELİRSİZLİĞİ ÇÖZÜMLERİNİN İNCELENMESİ" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Furkan KARLITEPE

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamda kıymetli bilgi ve tecrübeleriyle her daim yol gösteren, kendisi ile çalışmaktan her daim gururla bahsedeceğim hocam Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN'a hürmet ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmam süresince tez izleme jurimde bulunan, fikirlerini benimle paylaşan ve önerileri ile beni yönlendiren Doç. Dr. Taylan ÖCALAN ve Doç. Dr. Mustafa Tevfik ÖZLÜDEMİR'e teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarım boyunca bana destek olan, her zaman motive eden iş arkadaşlarım Arş. Gör. Ahmet DELEN, Arş. Gör. Abdullah Harun İNCEKARA, Arş. Gör. Dr. Ali Hasan DOĞAN, Yük. Mühendis Alparslan ACAR ve diğer bölüm çalışanlarına teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım sebebiyle kendilerine vakit ayıramadığım için her anın mahcubiyeti içinde olacağım, iki gözüm oğullarım Mahmud Adnan'ım ve Mustafa İshak'ıma borçluyum.

Onu bensiz, beni onsuz düşünemediğim eşime ithaf ederim. Bize varlıklarıyla ve dualarıyla her daim destek olan kıymetli büyüklerime minnettarım. Şükrüm Allah'adır.

Furkan KARLITEPE

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR iii
SİMGE LİSTESİ v
KISALTMA LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xi
ÖZET xii
ABSTRACT xiv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 2
1.2 Tezin Amacı 10
1.3 Hipotez 11
2 GNSS TEMELLERİ 12
2.1 Kod Ölçüsü 12
2.2 Taşıyıcı Faz Ölçüsü 24
3 TAŞIYICI FAZ BELİRSİZLİK ÇÖZÜMÜ 33
3.1 PPP Tekniğinde Faz Belirsizliği Çözümü 34
4 UYGULAMA 65
4.1 PPP-AR Tekniği ile FCB Sağlayıcı Servislerinin Yakınsama Sürelerinin Araştırılması 68
4.2 PPP-AR ve RT-PPP Tekniklerinin Yakınsama Süresi Üzerinden İncelenmesi 83
4.3 Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Güçlendirilmiş PPP-AR Çözüm Yaklaşımı 85
5 SONUÇ VE ÖNERİLER 100
KAYNAKÇA 104
A 2022.02 GÜNÜ GRAFİKLER 109
B 2022.03 GÜNÜ GRAFİKLER 112
C 2022.04 GÜNÜ GRAFİKLER 115
Ç 2022.05 GÜNÜ GRAFİKLER 118
D 2022.06 GÜNÜ GRAFİKLER 121
E 2022.07 GÜNÜ GRAFİKLER 124
F 2022.08 GÜNÜ GRAFİKLER 127
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 130

SİMGE LİSTESİ

$L_A^j(T_A)$	A noktasında uydu alıcı arası faz ölçüsü (Metre biriminde)
w	Açısal kız
b_{IF}^r	Alıcı kayıklığı
ς_r	Alıcı saat kayıklığı
Ω_k	Artan düğüm boylamı
$B(t)$	Beat sinyal
m_0	Birim standart sapma
r_k	Dairesel mesafe
v_k	Doğru anomali
E	Eksentrisite anomali
u_k	Enlem parametresi
μ	Evrensel gravite sabiti
$\varphi(t)$	Faz
f	Frekans
d_{wet}	Islak troposferik model
c	Işık hızı
L_{IF}	İyonosfer bağımsız faz mesafe ölçüsü (metre biriminde)
I_r^s	İyonosferik etki
N_A^j	J uydusu ve A noktası arasında tamsayı belirsizliği
k	Kalibrasyon sabiti
R	Kod ölçüsü
d_{dry}	Kuru troposferik model
f_1	L_1 sinyali
f_2	L_2 sinyali
$\Phi_A^j(T_A)_{L1}$	L_1 sinyaline ait faz ölçüsü (dalga biriminde)
N_{L1}	L_1 sinyaline ait tamsayı belirsizliği
N_{L2}	L_2 sinyaline ait tamsayı belirsizliği
$N_{A\,MW}^j$	MW tamsayı belirsizliği
N_{NL}	Narrow-Lane tamsayı belirsizliği
M_k	Ortalama anomali
Δt_{ref}	Rölativistik etki

λ	Sinyal dalga boyu
$STEC$	Slant total electron content
$Trop_{rec}^{sat}, Z_r^s$	Troposferik etki
$\rho^s(t, t^s)$	Uydu alıcı arasındaki kaba mesafe
b_{IF}^s	Uydu kayıklığı
ς^s	Uydu saat kayıklığı
t^s	Uydu saati
$m(elev)$	Uydu yükseklik açısı
λ_{WL}	Wide-Lane dalga boyu
$L_A^j(T_A)_{WL}$	Wide-Lane kombinasyonu
N_{WL}	Wide-Lane tamsayı belirsizliği
i_k	Yörünge düzlemi eğimi

KISALTMA LİSTESİ

BKG	The Federal Agency for Cartography and Geodesy
BNC	BKG Ntrip Client
CIS	Cascade Integer Ambiguity
CNES	Centre National D'Etudes Spatiales
CODE	Centre for Orbit Determination in Europe
CPS	Cycle Per Second
CTS	Conventional Terrestial Reference System
DCM	Decouple Clock Model
DD	Double Difference
DTree	Decison Tree
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
EKK	En Küçük Kareler
EPN	EUREF Permanent Network
EPOS	European Plate Observing System
ESA	European Space Agency
EOP	Earth Orientation Parameters
EUREF	European Terrestrial Reference Frame
EWL	Extra Wide-Lane
FARA	Fast Ambiguity Resolution Approach
FASF	Fast Ambiguity Source Filter
FCB	Fractional Cycle Bias
GFZ	German Research Centre for Geosciences
GIM	Global Ionosphere Model
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GPS	Global Positioning System
GRG	Groupe de Recherche en Geodesie Spatiale
IF	Ionosphere Free
IGS	International GNSS Service
IGS RTS	International GNSS Service Real Time Service
IONEX	The Ionosphere Map Exchange Format Version
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
KNN	K-Nearest Neighbours

LAMBDA	Least Square Ambiguity Decorrelation Adjustment
LMS	Local Minima Search
LSAST	Least Square Ambiguity Source Technique
MGEX	Multi-GNSS Experiment
ML	Medium-Lane
MW	Melbourne Wübbenna
NGS	National Geodetic Survey
OMEGA	Optimal Method for Estimating GPS Ambiguities
PANDA	Positioning And Navigation Data Analyst
PCM	Phase Clock Model
PDOP	Position Dilution of Precision
PPP	Precise Point Positioning
PPP-AR	Precise Point Positioning Ambiguity Resolution
PPP-RA	Precise Point Positioning Regional Augmentation
PPP-SF	Precise Point Positioning Single Frequency
RBF	Radial Basic Function
RF	Random Forest Regressor
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RMS	Root Mean Square
RTCM	Radio Technical Commission For Maritime Services
RTCM/SSR	RTCM/State Space Representation
RTK	Real Time Kinematic
RT-PPP	Real Time Precise Point Positioning
SDBS	Single Difference Between Satellites
SIO	Scripps Institution of Oceanography
SPARTN	Safe Positioning Augmentation for Real Time Navigation
SSR	State Space Representation
SSRZ	SSR Compressed Format
STEC	Slant Total Electron Content
SVM	Support Vector Machine
TAI	International Atomic Time
TEC	Total Electron Content
TECU	Total Electron Content Unit
TGD	Total Group Delay
UFO	Uncalibrated Fractional Offset

UHD	Uncalibrated Hardware Delay
UPD	Uncalibtared Phase Delay
UTC	Coordinated Universal Time
WGS84	World Geodetic System 1984
VMF1	Vienna Mapping Functions 1
VTEC	Vertical Total Electron Content
ZD	Zero Difference

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Uydudan çıkış zamanı ve alıcıya giriş zamanı (Subirana vd., 2013)'den değiştirilerek kullanılmıştır **14**

Şekil 2.2 Uydu saat hatasının hesaplanması için navigasyon dosyası içindeki veriler (Subirana vd., 2013) **15**

Şekil 2.3 Kepler elemanları (Subirana vd., 2013) **18**

Şekil 2.4 Navigasyon dosyası içeriği (Subirana vd., 2013) **18**

Şekil 2.5 Lagrange enterpolasyonu ile uydu koordinatlarının eğrisi **22**

Şekil 2.6 Navigasyon mesajında gösterilen TGD değeri (Subirana vd., 2013) **23**

Şekil 2.7 Dalga sinyal modeli **25**

Şekil 2.8 Alıcı ve uydu sinyali arasındaki faz farkı **27**

Şekil 2.9 Faz ölçüsünün geometrik yorumu (Hofmann-Wellenhof vd., 2007) **29**

Şekil 3.1 RF algoritması regresyonu (Evren, 2022) **63**

Şekil 4.2 Çözüm yapılan IGS istasyonları **73**

Şekil 4.3 Çalışma günlerine ait Kp-Indeks değerleri **73**

Şekil 4.4 Net_Diff yazılımı ile PPP ve PPP-AR tekniklerinde tamsayı belirsizliği çözüm şeması **74**

Şekil 4.5 IGS istasyonlarının farklı servislerde 10 günlük standart sapma değerleri **83**

Şekil 4.6 PPP-AR ve RT-PPP tamsayı belirsizlik çözümlerinin karşılaştırma akış şeması **84**

Şekil 4.7 TUSAGA-AKTİF İstasyonlarının harita üzerinde gösterimi **86**

Şekil 4.8 Kuzey koordinatları için yakınsama sınırları **90**

Şekil 4.9 Doğu koordinatları için yakınsama sınırları **90**

Şekil 4.10 Yukarı koordinatları için yakınsama sınırları **90**

Şekil 4.11 İstasyonlarda PPP-AR/SDBS ve PPP-AR/Makine öğrenmesi algoritmaları çözüm aşaması **92**

Şekil 4.12 AFYN, HINI, NIGD and TOK1 istasyonlarının 7 günlük ortalaması alınmış metre mertebesi hassasiyet için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatlarının RMS değerleri **95**

Şekil 4.13 AFYN, HINI, NIGD and TOK1 istasyonlarının 7 günlük ortalaması alınmış santimetre mertebesi hassasiyet için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları RMS değerleri **97**

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 GPS uyduları için frekanslar ve kombinasyonlar (Laurichesse & Blot, 2016)'dan alınarak düzenlenmiştir **46**

Tablo 4.1 WUHAN, CODE, CNES, GRG ve JAXA için kombine faz sinyal kayıklıkları **66**

Tablo 4.2 RT-PPP tekniğinde kullanılan yörünge ve saat düzeltmesinin sağlamış olduğu SSR mesajlar (IGS, 2022) **67**

Tablo 4.3 Net_Diff v1.14 yazılımında PPP ve PPP-AR ölçüleri yapılırken seçilen parametreler (Yize, 2020) **69**

Tablo 4.4 Çözüm yapılan istasyonlara ait anten tipi, alıcı tipi ve yaklaşık koordinatlar **70**

Tablo 4.5 İstasyonların Kuzey koordinatlarına ait ortalama yakınsama epokları ve standart sapmaları **75**

Tablo 4.6 İstasyonların Doğu koordinatlarına ait ortalama yakınsama epokları ve standart sapmaları **77**

Tablo 4.7 İstasyonların Yukarı koordinatlarına ait ortalama yakınsama epokları ve standart sapmaları **80**

Tablo 4.8 IGS istasyonlarının 10 günlük Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat değerlerinin ortalaması **83**

Tablo 4.9 DLF1 ve GOPE alıcı kayıklıkları **85**

Tablo 4.10 PPP ve PPP-AR modelleri için metre mertebesi doğruluğu yakaladığı epoklar **89**

Tablo 4.11 PPP ve PPP-AR modelleri için santimetre mertebesi doğruluğu yakaladığı epoklar **89**

Tablo 4.12 AFYN, HINI, NIGD ve TOK1 istasyonlarının metre mertebesi hassasiyet için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat RMS değerleri **94**

Tablo 4.13 İstasyonların metre yakınsama sınırı için 7 günlük RMS değerleri **95**

Tablo 4.14 AFYN, HINI, NIGD ve TOK1 istasyonlarının santimetre mertebesi hassasiyet için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat RMS değerleri **96**

Tablo 4.15 İstasyonların santimetre yakınsama sınır için 7 günlük RMS değerleri **98**

Tablo 4.16 Yakınsama sınırına göre tamsayı belirsizliği belirlendikten sonra 7 günlük RMS değerleri **98**

Tablo 4.17 PPP çözümünün tamsayı belirsizliği belirlendikten sonra 7 günlük RMS değerleri **99**

ÖZET

GPS hassas mutlak konum belirlemede tamsayı belirsizliği çözümlerinin incelenmesi

Furkan KARLITEPE

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Programı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN

Hassas mutlak konum belirlemede (Precise Point Positioning, PPP) kod ve faz sinyalleri kullanılarak uydu ve alıcı arasındaki mesafe hesaplanır. PPP çözümünde kod-faz ölçüsünün fonksiyonel modeli, uydunun konum bilgisi, uydu-alıcı saati ve tamsayı belirsizliği gibi hata kaynaklarından etkilenir. Tamsayı belirsizliği bağımsız bir hata kaynağı olmayıp FCB (Fractional Cycle Bias) ürünlerinden etkilenir. FCB ürünlerinin kestirilip tamsayı belirsizliğinden ayrılması gerekir. FCB ürünlerinin kestirimi ve belirsizlikten ayrılması PPP-AR (PPP-Ambiguity Resolution) tekniği olarak bilinir. Bu tez çalışması üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada WUHAN, CODE, CNES ve JAXA servisleri tarafından sağlanan FCB ürünleri kullanılarak PPP-AR çözümleri gerçekleştirilmiştir. 2022 yılının on günü boyunca 40 uluslararası GNSS servis istasyonundan gözlemler analiz edilmiştir. Sonuç olarak WUHAN servislerinin kısa süreli gözlemlerde diğer servislerden daha hızlı yakınsadığı görülmüştür. İkinci aşamada PPP-AR tekniğinin belirsizlik çözümü, RT-PPP (Real Time PPP) tekniğinin belirsizlik çözümüne göre karşılaştırılmıştır. PPP-AR tekniğinde ise GRG ve WHU servislerinin üretmiş olduğu FCB ürünleri kullanılmıştır. Buna göre GRG ve WHU servislerinin

sağlamış olduğu kayıklıklar yakınsama süreleri, epok sayısı ve konum hassasiyetleri üzerinden karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında yapılan analizlere göre GRG ve WHU servisleri, Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatlarında ilk 50 epok için 0.05 m yakınsama sağlarken, RT-PPP tekniğinde ilk 2000 epoktan sonra desimetre düzeyinde doğruluğa ulaşılabilmiştir. Son kısımda ise Python'da PPP ve PPP-AR çözümleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 6 TUSAGA-Aktif istasyonu ile FCB değerleri hesaplanmıştır. Uydular için hesaplanan FCB değerleri 4 TUSAGA-Aktif istasyonunda kullanılarak belirsizlik kestirimi yapılmıştır. PPP-AR/SDBS tekniğinin Wide-Lane FCB kestirimi ve Narrow-Lane FCB kestirim aşamasında makine öğrenmesi algoritmaları (Random Forest, SVM: Support Vector Machine, Decision Tree ve K-Nearest Neighbours) ve robust kestirici (Medyan Yöntemi) kullanılmıştır. Bu algoritmalar ile tamsayı belirsizliği başarısı Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat değerleri üzerinden incelenmiştir. Santimetre mertebesinde bütün algoritmalar SDBS'den daha iyi konum doğruluğu üretirken, algoritmalar arası en iyi konum doğruluğu SVM algoritması ile sağlanmıştır. Ayrıca, Medyan ile elde edilen doğruluklar da SDBS ile benzer sonuçlara sahiptir.

Anahtar Kelimeler: GNSS, PPP, PPP-AR, FCB, SDBS

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ABSTRACT

Investigation of integer ambiguity solutions in GPS Precise Point Positioning

Furkan KARLITEPE

Department of Geomatic

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Bahattin ERDOĞAN

Precise Point Positioning (PPP) uses code and phase signals to calculate the distance between the satellite and the receiver. In PPP, the functional model of the code-phase measure is affected by some error sources such as satellite position information, satellite-receiver clock and integer ambiguity. Integer ambiguity is not an independent error source but is affected by FCB (Fractional Cycle Bias) products. FCB products need to be estimated and separated from integer ambiguity. The estimation of FCB products is known as PPP-AR (PPP-Ambiguity Resolution) technique. This thesis work was carried out in three stages. In the first phase, PPP-AR solutions were performed using FCB products provided by WUHAN, CODE, CNES and JAXA services. Observations from 40 international GNSS service stations during ten days of 2022 were analyzed. As a result, it was observed that WUHAN services converged faster than other services for short time observations. In the second stage, the ambiguity solution of the PPP-AR technique is compared to the ambiguity solution of the RT-PPP (Real Time PPP) technique. In the PPP-AR technique, FCB products produced by GRG and WHU services were used. According to the analyses conducted within the scope of the study, GRG and WHU services provided 0.05 m convergence for the first 50 epochs in the North, East and Up coordinates, while the RT-PPP technique achieved decimeter-level accuracy after the first 2000 epochs. In the last part, PPP and PPP-AR solutions were realized

in Python. For this purpose, FCB values were calculated with 6 TUSAGA-Aktif stations. The FCB values calculated for satellites were used in 4 TUSAGA-Aktif stations for ambiguity solution. In the Wide-Lane FCB estimation and Narrow-Lane FCB estimation phase of the PPP-AR/SDBS technique, machine learning algorithms (Random Forest, SVM: Support Vector Machine, Decision Tree and K-Nearest Neighbors) and robust estimator (Median Method) were used. With these algorithms, the success of integer ambiguity solution was analyzed for North, East and Up coordinate values. While all algorithms produced better position accuracy than SDBS at the centimeter level, the SVM algorithm provided the best position accuracy among the algorithms. In addition, the accuracies obtained with Median are similar to SDBS.

Keywords: GNSS, PPP, PPP-AR, FCB, SDBS

1
GİRİŞ

Günümüz jeodezik GNSS (Global Navigation Satellite System) alıcıları ve GNSS uyduları ile farklı teknikler kullanılarak istenilen hassasiyetlerde konum doğruluğuna ulaşmak mümkündür. Bunun için literatürde mutlak konum belirleme, rölatif konum belirleme, diferansiyel konum belirleme ve hassas mutlak nokta konum belirleme olarak dört temel teknikten bahsedilir. Bu tekniklerin farklı hassasiyetlerde kendi içerisinde sabit (statik), hareketli (kinematik) ve gerçek zamanlı (anlık) uygulamaları bulunur. Her bir teknikte farklı uygulamalar için karşılaşılan birden çok hata parametresi ve bu parametrelere bağlı olarak istenilen konum hassasiyetinden sapmalar meydana gelebilir. PPP (Precise Point Positioning) olarak isimlendirilen hassas mutlak nokta konum belirleme tekniği hem taşıyıcı faz hem de kod gözlemlerinin beraber kullanıldığı, anlık olarak yardımcı istasyonlardan düzeltme verisine ihtiyaç duyulmadan, iyonosfer bağımsız (IF: Ionosphere Free) faz ve kod ölçüleri kullanılarak, fark alma yöntemleri kullanılmadan, çift frekanslı bir GNSS alıcısı ile cm-dm mertebesinde konum hassasiyetinin yakalanabildiği bir tekniktir (Öcalan, 2015; Zumberge vd., 1997). PPP tekniğinde ham kod ve faz ölçülerinden elde edilmiş uydu alıcı arası yaklaşık mesafe ve düzeltme mesajları kullanılarak konum bilgisi üretilir. Konum bilgisi uydu alıcı arasındaki yaklaşık mesafe faz ve kod ölçülerinin işlenmesi ile elde edilir. Burada mesafenin yaklaşık olarak ifade edilmesinin birçok sebebi vardır. Uydu alıcı arası gerçek mesafenin elde edilmesi için farklı nedenlerle ortaya çıkan hata kaynaklarının modellenmesine ihtiyaç duyulur. Hata parametrelerinin modellenmesi için gerekli bilgiler farklı bilimsel kuruluşlardan elde edilir. PPP düzeltme mesajları uydu yörünge ve saat bilgisi, kod ve faz kayıklıklarıdır. Bu hata parametrelerinden en önemlisi hassas uydu yörünge ve saat bilgisidir (Laurichesse vd., 2009). Ölçü sonrası gerçekleştirilen analizlerde farklı bilimsel kuruluşlar tarafından yayımlanan hassas uydu yörünge ve saat bilgilerinin dikkate alınması gerekir. Gerçek zamanlı uygulamalar içinse uydu yörünge ve saat ürünleri dünya çapında kurulmuş gözlem istasyon ağından hesaplanarak olabildiğince ölçüm zamanına yakın kestirilip kullanıcılara iletilmesi beklenir. Bu ürünler küresel gözlem istasyonları veya bölgesel istasyonlardan yapılan gözlemlere Kalman

filtreleme metodu ile kestirim yapılarak üretilir (Laurichesse vd., 2010). IGS (International GNSS Service), BKG (The Federal Agency for Cartography and Geodesy), GFZ (German Research Centre for Geosciences), EUREF (European Terrestrial Reference Frame), ESA (European Space Agency) gibi uluslararası oluşumlar tarafından ağ istasyon noktaları kullanılarak kalman filtreleme ile kestirilen yörünge saat bilgileri ortalama 6 ila 8 saniye gecikme sonucu alıcıya iletilerek konum belirleme sağlanmaktadır (Alçay & Atiz, 2021; Erdogan vd., 2018; Laurichesse, 2011). Bununla birlikte faz ölçüsüne ait uydu-alıcı saati kayıklıkları, kod ölçüsüne ait uydu-alıcı saati kayıklıkları, zenit troposferik gecikme, uydu koordinat doğruluğu ve faz belirsizliği hesaplanması gereken hata parametreleridir (Laurichesse vd., 2010). Geleneksel PPP matematiksel modelinde IF kombinasyonları kullanıldığı için iyonosferik etki yüksek oranda giderilir. Geleneksel PPP'de ayrıca uydu ve alıcı anteni faz merkezi kayıklıkları ve değişimleri, diferansiyel grup gecikmesi (Öcalan, 2015; Witchayangkoon, 2000), Rölative/Doppler etkisi (Blewitt, 1997), okyanus yüklemesi, kutup gezinmesi ve kutup gezintisine bağlı olarak datum belirlenmesi, (plaka) tektonik hareketler, sinyal çok yolluluğu (Multipath), dış etkenlere bağlı faz sıçraması (cycle slip) gibi hataların da konum hassasiyetine etkisi bulunur.

Geleneksel PPP tekniğinin istenilen doğrulukta konum bilgisi üretebilmesinde bir başka etken de tamsayı belirsizliğidir. Tamsayı belirsizliği çözümü bağıl konum belirleme ve geleneksel PPP'de çok sayıda araştırmacının çalışma konusu olmuştur.

1.1 Literatür Özeti

PPP tekniğinden farklı olarak bağıl konum belirlemede tamsayı belirsizliği çözümü için fark alma yöntemleri kullanılır. Tamsayı belirsizliği çözümü faz ölçüleri arasında ikili fark alma (DD: Double Differenced) yöntemi kullanılarak sağlanır (Laurichesse, 2011). DD yöntemi ile yüksek oranda tamsayı belirsizliği ve sinyal kayıklıkları elimine edilmektedir (Blewitt, 1997; Öcalan, 2015). DD yöntemi tamsayı belirsizliğini kolaylıkla tanımlayarak hataların çoğunu giderdiği için çok güçlüdür. Aynı zamanda alıcı ve uydu saat kayıklıklarını da gidererek problemi minimize eder (Laurichesse, 2011). Bu yönleriyle DD yöntemi bağıl konum belirleme tekniği için vazgeçilmezdir. DD yöntemi kullanılarak tamsayı belirsizliği çözen algoritmalar LAMBDA (Least Square Ambiguity Decorrelation Adjustment)

(Teunissen, 1993), LMS (Local Minima Search) (Pratt vd., 1997), LSAST (Least Square Ambiguity Source Technique) (Rizos ve Han, 1995), FARA (Fast Ambiguity Resolution Approach) (Frei, 1991), FASF (Fast Ambiguity Source Filter) (Chen, 1993), OMEGA (Optimal Method for Estimating GPS Ambiguities) (Lachapelle vd., 1992)'dır. Bu algoritmalar DD yöntemini kullandıkları için ölçüler arasındaki korelasyonu artırarak veri analizi için bir yük ortaya çıkarmaktadırlar (Ge vd., 2008; Kurt, 2003). Ayrıca DD yöntemi iki farklı alıcı ve iki farklı uydunun ölçü farkları alınarak uygulandığından alıcılar arasındaki mesafe kısıtlayıcıdır. Bağıl konum belirlemeye alternatif olan PPP çözümü, ölçüm istasyonları arasındaki bağımlılıkları azaltmaya izin verir ve bir istasyondaki konum hassasiyetini bozan hatanın diğer istasyonlara geçişini engeller (Nykiel & Figurski, 2016). Uydu takımının hassas uydu yörünge ve saat ürünlerine bağlı tamsayı değerini etkileyen kayıklıklar küresel veya bölgesel ağlardan kestirilerek çözüme eklenir. Geleneksel PPP tekniğinde belirsizliğin tamsayısına doğrudan ulaşılmaz ancak rastgele sabit hatalar kestirilerek erişilebilir (Collins vd., 2010). Eğer söz konusu saat kayıklıkları istenilen hassasiyette kestirilirse fark alma teknikleri kullanılmadan belirsizliğin tamsayı değerine ulaşılabilir (Laurichesse vd., 2009). Literatürde tamsayı belirsizliğinin çözümü için birçok kestirim algoritması üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Geleneksel PPP'de IF kod ve faz gözlemleri kullanıldığı için ZD (Zero Differenced) belirsizlik kestiriminde tam dalga sayısı, alıcı saat kayıklığı ve uydu saat kayıklığı kombine edilerek çözüme dahil edilir. Ayrıca kestirilen belirsizlikler hem kod hem de faz ölçülerine ait saat kayıklıklarının sabit zaman kısımlarını da içerir. Buna bağlı olarak IGS kod saat düzeltmesi getirilir. İyonosfer bağımsızlık için uygulanan kombinasyonlar belirsizlik kestiriminde uydu ve alıcı saat kayıklıklarını da kombine ederek absorbe eder. Bu kombine edilen faz ve kod için saat kayıklıkları FCB (Fractional Cycle Bias) olarak bilinmektedir. PPP tamsayı belirsizliğinde FCB değeri tamsayı özelliğinin kaybolması anlamına gelir (Geng vd., 2010; Shi & Gao, 2014). Her uydu ve alıcı için olduğu varsayılan FCB (Teunissen & Kleusberg, 1998), Blewitt (1997) tarafından 1 ns doğrulukla sabit kabul edilse de zaman içerisinde sistematik olarak değişir (Gabor & Nerem, 1999). FCB'nin zamanla değişmeyen kısımlarının ZD belirsizlik kestiriminden ayrıştırılamayacağı düşünülür (Zumberge vd., 1997). Ancak uydu sinyalleri üzerinden farklı

kombinasyonlar ve matematiksel modeller geliştirilerek FCB'nin zamanla değişen ve değişmeyen kısımları ayrılabilir. Böylece FCB'nin faz ölçüsü tam dalga sayısına olan etkisi giderilebilir (Geng vd., 2010). Literatürde FCB'nin tamsayı belirsizliği üzerine etkisini giderebilmek için birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında literatür incelendiğinde FCB kestiriminin (Geng vd., 2010), UPD (Uncalibrated Phase Delay) (Ge vd., 2005), UHD (Uncalibrated Hardware Delay) (Geng vd., 2006) ve UFO (Uncalibrated Fractional Offset) (Li & Zhang, 2012) gibi farklı isimlerle kullanıldığı görülmüştür. Çalışmanın akışı bozulmaması adına literatür atıflarında FCB tercih edilmiştir.

Tamsayı özelliğinin bozucu etkisinin giderilmesi için literatürde üç farklı yöntemden bahsedilir. Bunlardan ilki Ge vd. (2008) tarafından uydular arası tekli fark alma (SDBS: Singel Difference Between Satellites) yöntemi olarak duyurulmuştur. İkincisi Collins (2008) tarafından ayrıştırılmış saat modeli (DCM: Decouple Clock Model) olarak, bir diğeri ise Laurichesse vd. (2009) tarafından faz ölçüsüne ait saat modeli (PCM: Phase Clock Model) olarak duyurulmuştur.

İlk olarak Gabor ve Nerem (1999) tarafından tamsayı belirsizlik çözümünde dalganın tam değerini bozan FCB ürünlerinin uydular arası SDBS modeli ile hesaplanması önerilmiştir. Colombo vd. (2004) alıcı kaynaklı uydu hatasının giderilmesi için SDBS yöntemi ile statik yöntemde birkaç cm doğrulukla konum doğruluğu sağlamıştır. Ge vd. (2008) çalışmasında SDBS yöntemi ile 180 istasyonlu ağ noktasından FCB kestiriminden bahsedilmiştir. FCB'nin giderilmesi için PPP tekniğinde GNSS uydularından gönderilen çift frekans (GPS için L_1 ve L_2) ile Wide-Lane (yaklaşık 86 cm dalga boyu) ve Narrow-Lane (yaklaşık 11 cm dalga boyu) faz ve kod kombinasyonları kullanılır. Ge vd. (2008) tarafından günlük FCB kestirimleri ile konum belirleme doğruluğu yaklaşık %10 oranında iyileştirilirmiş ve FCB'nin giderilmesinin daha iyi faz belirsizlik çözümü sağladığı ortaya konulmuştur.

GFZ'nin EPOS (European Plate Observing System) yazılımı SDBS kullanarak FCB kestirimi gerçekleştirmektedir. Bu sayede Wide-Lane ve Narrow-Lane çözümleri sağlanmaktadır. Ayrıca PANDA (Positioning And Navigation Data Analyst) yazılımında da SDBS yöntemi kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve düşey doğruluktaki iyileşmenin yatay doğruluğun çok altında kaldığı görülmüştür (Ge vd., 2008; Shi, 2012). Söz konusu yöntem ile tamsayı belirsizliği çözülmekte

fakat bu yöntemde doğruluk az olduğu gibi ağ destekli DD yöntemi kullanıldıktan sonra hedeflenen doğruluk derecelerine ulaşılamamaktadır ve dahası 24 saatlik gözlemlerde dahi doğu bileşeninin doğruluğu DD çözümlerindeki kadar hassas olmamaktadır (Ge vd., 2008). Geng vd. (2009) çalışmasında Ge vd. (2008)'de yapmış olduğu çalışmayı geliştirerek PPP tekniğinde tek istasyondan tamsayı belirsizliği çözülebilmesi için FCB'nin belirlenebilmesi gerektiği ve dahası bunun yardımcı bir GNSS ağı desteği ile mümkün olacağı vurgulanmıştır. Bunun üzerine EPN (EUREF Permanent Network) ağı üzerinden Wide-Lane FCB kestirimleri günlük olarak hesaplanmıştır. Wide-Lane FCB kestirimlerinden sonra Narrow-Lane FCB kestirimleri zamanla çok değişkenlik göstermesi ve yaklaşık 11 cm'lik kısa dalga boyu nedenleriyle daha küçük periyotlar da hesaplanabilmiştir. Aynı çalışmada saat başı FCB kestirimi yapılarak konum belirleme doğruluğunun %70'e kadar iyileştirildiği gösterilmiştir (Geng vd., 2009). Geng vd. (2009), uluslararası ağlarda FCB ile elde edilen tamsayı belirsizliği iyileştirmesini denememişlerdir. Bu iyileştirme, bölgesel ağlardan kestirilmiştir. Ayrıca tamsayı belirsizliğinin tam olarak giderilmesi için 3 saatlik gözlem süresine ihtiyaç duyulacağı belirtilmiştir. Li ve Zhang (2012) tarafından fark alma yöntemleri kullanılmaksızın Wide-Lane ve Narrow-Lane FCB değerleri hesaplanmıştır. Yoğun ağ istasyonlarının bulunduğu yerlerde FCB değerleri daha hassas belirlenmiş ve faz belirsizlik çözümünü iyileştirmiştir. Geng vd. (2011) çalışmasında Wide-Lane belirsizlik çözümünün %90'nını çözmek için en az 10 dakika gerekeceğini ve güvenilir Narrow-Lane belirsizlik çözümü için onlarca dakika gerekebileceğini belirtmiştir. Zhang vd. (2013) çalışmasında uluslararası ağlardan Wide-Lane ve Narrow-Lane belirsizlik kestirimi yapılmıştır, dahası PPP kullanıcılarına düzeltme olarak yayınlanması için bir çalışma gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada hem PPP-kinematik hem PPP-statik uygulamalarda tüm uyduların Wide-Lane ve Narrow-Lane FCB ürünleri, uydu yörünge ve saat ürünleri ile çözülmüş ve belirsizlik çözümü iyileştirilmiştir. PPP-statik konum belirlemede tamsayı belirsizliği çözüldükten sonra kesirli çözümler ile karşılaştırılmış ve doğruluğun %57 kadar arttığı gözlenmiştir. PPP-kinematik konum belirlemeye göre ise doğruluğun %50 kadar arttığı ortaya konulmuştur (Zhang vd., 2013). Ayrıca Li vd. (2013) tarafından daha güvenilir belirsizlik çözümü için gerekli olan yakınsama süresini düşürmeye yönelik yeni veri işleme planı sunulmuştur. L_1 ve L_2 frekanslarında FCB'ler oluşturmak için gerçek zamanlı bir hesaplama prosedürü geliştirmişlerdir. L_1 ve L_2

frekanslarında FCB'ler kullanılarak kinematik çözümler için yakınsama süresi yaklaşık %30 azaltılabilir ve belirsizlik çözümü ise yaklaşık %25 iyileştirilebilir. Önerilen yeni yöntem ile statik çözümlerde belirsizlik çözümü için yakınsama süresi 10 dakika olarak bulunmuştur (Li vd., 2013). Navigasyon Enstitüsü tarafından düzenlenen uluslararası teknik toplantıda (ION GNSS 2016) Nykiel ve Figurski (2016) çalışmasında IF kod kombinasyonu, Wide-Lane ve Narrow-Lane faz kombinasyonlarını en küçük kareler yöntemi kullanarak tek bir fonksiyonel modelde incelemiştir. Bu çalışmada SDBS kullanılarak alıcı saat hatası elimine edilmiş ve yakınsama süresi azaltılmıştır.

Dai vd. (2019) çalışmasında gerçek zamanlı saat kestirimi metodu tarafından oluşturulan belirsizlik çözüm stratejisi ile Wide-Lane ve Narrow-Lane FCB kestirimi yapılmıştır. Ardından Wide-Lane ve Narrow-Lane FCB'lerden IF belirsizlikler hesaplanmıştır. Önerilen belirsizlik çözüm ve saat kestirimi stratejisi 2017'nin 180-209 günleri arasında 85 IGS MGEX (Multi-GNSS Experiment) referans istasyonundan 30 saniyelik gözlemler ile test edilmiştir. Wide-Lane ve Narrow-Lane FCB kestirimleri yapılarak belirsizlik sabitlenmiş saat çözümleri ile kuzey yönünde en az %5, doğu ve yukarı yönde ise en az %10 iyileşme elde edilmiştir (Dai vd., 2019). Faz ve kod ölçüleri için FCB etkisinin giderilmesi tamsayı belirsizliğinde önemli bir aşamadır. Yer bilimi için Alman araştırma merkezi GFZ araştırma merkezi, 2007'den beri Geleneksel PPP, PPP-AR (PPP-Ambiguity Resolution), PPP-RA (PPP Regional Augmentation), PPP-SF (PPP using single frequency receivers) gibi farklı senaryolar üzerine çalışmalar gerçekleştirmektedir. Farklı senaryolara ait doğruluk ve yakınsama süresi sırasıyla 5-10 cm/yaklaşık 30 dk, 2-5 cm/yaklaşık 20 dk, 1-3 cm/yaklaşık 2 dk ve 50 cm/5dk olarak belirtilmiştir (GFZ, 2021). Tamsayı değerini bozan FCB etkisinin giderilmesi için ağ istasyonlarından kestirim algoritmaları kullanılarak geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Laurichesse vd. (2009) ve Collins (2008) tarafından yapılan çalışmalarda ise Narrow-Lane FCB doğrudan kestirilmekten kaçınılmıştır.

Collins (2008) tarafından uydu ve alıcı için ayrıştırılmış saat parametresinin tamsayı belirsizliği çözümündeki etkisi kanıtlanmış ve bu çalışma tarafından ayrıştırılmış saat modeli (DCM) olarak bilinen yeni bir GPS gözlem modeli sunulmuştur. Saat parametreleri, kod ve faz kayıklıkları, belirsizlikler kombine

edilen kod-faz çözümleri (standart gözlem modeli) nedeniyle birbirleriyle sıkı sıkıya ilişkilidir. Standart gözlem modelinde taşıyıcı faz ölçümlerindeki tam dalga sayısı belirsiz olduğu için saat çözümü kod ölçüsü üzerinden yapılır. Bu yüzden standart gözlem modelinde kombine edilen kod ve faz ölçülerinde kod kayıklığının da taşıyıcı faz belirsizliğine etkisi bulunur (Collins, 2008). Collins vd. (2010) çalışmasında Ge vd. (2008) çalışmasına atıf yaparak belirsizlik çözümünde kullandığı SDBS yönteminin kod ve faz kayıklıklarını, saat parametrelerinin çözümüne dahil etmediğini vurgulamıştır. Ayrıca uydular arası fark alarak da olsa fark alma tekniği kullandığı için PPP temel prensibinin bozulduğunu ifade etmiştir. DCM modeli kod ve faz matematiksel modellerini kesin olarak birbirinden ayırarak, kod kayıklığının taşıyıcı faz tamsayı değerini bozma durumunu ortadan kaldırmıştır (Collins, 2008). Kod kayıklığını, faz matematiksel modelinden ayırmak PPP-AR tekniği ile mümkündür. Bu matematiksel model kod ve faz ölçüleri için iki adet IF kombinasyon ve bir adet MW (Melbourne-Wübbenna) kombinasyonu içerir. MW kombinasyonu ile ardışık olarak Wide-Lane tamsayı çözümü ve Narrow-Lane tamsayı çözümü gerçekleştirilir (Collins, 2008). Kod ve faz IF kombinasyonunda her bir gözlem uydu ve alıcı saat parametreleri ve bu saat parametrelerinin kayıklıklarını barındırır. MW kombinasyonu ise Wide-Lane belirsizlik kayıklığını içerir. Her bir epokta saat ve FCB parametrelerini ayırmak için IGS ağ istasyonları tarafından yayınlanan uydu yörünge ve saat bilgisi kullanılır. Bu sayede belirsizliğin tamsayı doğası korunur (Collins, 2008; Shi & Gao, 2012; Teunissen & Oliver, 2017). Bilinmeyenler arasında güçlü bir varyans kovaryans matrisi oluşturulur. Lineer denklem formundaki bilinmeyenler üç koordinat, üç alıcı ayrıştırılmış saati, bir troposfer gecikmesi ve n uydu sayısı olmak üzere $2\,(n-1)$ tamsayı belirsizliğidir. Bu çözümde tamsayı belirsizliği kesirli olarak denkleme girer. Tamsayı belirsizliği sabitlendikten sonra çözüm yeniden güncellenir (Shi & Gao, 2012). Tamsayı belirsizliği $(n-1)$ Wide-Lane ve $(n-1)$ N_1 olmak üzere iki farklı dalga boyunda gruplandırılır. 86.7 cm'lik Wide-Lane dalga boyundan dolayı hızlı tamsayı belirsizliği çözümüne olanak vermek için birinci olarak Wide-Lane belirsizlik sabitlenecektir. Wide-Lane belirsizlik sabitlendikten sonra kesirli olarak N_1 belirsizlik ve kalan parametreler çözülmüştür. Collins (2008) çalışmasında saatlik gözlemler ile DCM parametrelerini hesaplayarak tamsayı belirsizliği çözümünde istenilen başarı sağlanamamıştır.

Saatlik gözlemler yerine günlük gözlemler kullanıldığında da yatayda istenilen başarı elde edilememiştir.

Laurichesse vd. (2009) çalışmasında çift frekanslı GPS (Global Positioning System) alıcıları ile fark alma yöntemleri kullanılmadan konum belirlemede belirsizliklerin giderilmesi için PCM olarak isimlendirilen faz belirsizlik çözümünden bahsedilmiştir. Bahsedilen PCM yaklaşımı tamsayı özelliğini bozan FCB değerini kestirebilmek için bölgesel ya da küresel ağlardan MW ve IF kombinasyonunu kullanır. Bu yaklaşım iki adımdan oluşur birincisi MW kombinasyonu ile Wide-Lane FCB kestirilir. Birinci aşamada geometrik modele (yörünge bilgileri, saat bilgileri ve alıcı koordinatları gibi) ihtiyaç duyulmaz. İkinci aşamada küresel bir ağ üzerinden IF kombinasyon ile Narrow-Lane FCB kestirilerek giderilir (Laurichesse vd., 2010; Li vd., 2014). Bu süreçte IF faz kombinasyonu ile ilişkili faz ölçüsüne ait saat düzeltmeleri kestirilir. Hesaplanan faz ölçüsüne ait saat belirsizliği tamsayı değerini korur. Bu ise PPP'de tamsayı belirsizliği çözümüne olanak sağlar. CNES (Centre National D'Etudes Spatiales) tarafından özellikle gerçek zamanlı uygulamalarda tamsayı belirsizliğini kestirebilen bu yapı Real-Time IGS Pilot projesi çerçevesinde ION GNSS 2011 teknik toplantısında "Integer PPP" olarak duyurulmuştur. 2010 yılında Real-Time IGS Pilot projesine dahil olan CNES, yörünge ve saat ürünleri üreterek analiz merkezi olarak katkı verir. Ayrıca analiz merkezlerinden PPP kullanıcılarına RTCM 3.1 mesajları olarak iki farklı amaç için tamsayı ürünleri çözümü sağlar. Birinci amaç IGS RTS (International GNSS Service Real Time Service) pilot projesi gelişimi için, ikincisi tamsayı belirsizliği çözümü içindir. Birinci amaç doğrultusunda CNES sunucusu aracılığıyla (products.igs- ip.net) CLK9x yörünge saat ürünleri yayınlanır (Laurichesse, 2011). PCM modeli kapsamında CNES tarafından geliştirilen GINS/Dynamo yazılımında faz kombinasyonları kullanılarak matematiksel model oluşturulmuştur. Bu yazılımda faz kombinasyonları ile matematiksel model oluşturularak faz belirsizliğini etkileyen hata parametreleri giderilebilir (Laurichesse vd., 2010). Ayrıca yörünge ve saat bilgileri, istasyon koordinatlarının kestirimi, EOP (Earth Orientation Parameters) parametreleri gibi parametreler Wide-Lane faz kombinasyonu ile çözülerek tamsayı belirsizliğinin giderilmesine olanak vermiştir. GINS/Dynamo yazılımı ile üretilen sonuçlar IGS final ürünleri ile karşılaştırılmış ve IGS yörüngeleri ile tutarlı sonuçlar sağlamıştır

(Loyer vd., 2012). GINS/Dynamo yazılımının getirmiş olduğu yenilikçi yöntemler sadece yörüngede değil aynı zamanda uydu saat kayıklıklarına da katkı vermiştir. Hem uydu saat kayıklığı hem de yörünge doğruluğunun artması tamsayı belirsizliğinin çözümüne de katkı sunmuştur. Laurichesse vd. (2010) çalışmasında düşük ve yüksek uydu yörüngeleri için sırasıyla 30 dakika ve 5 dakika Wide-Lane belirsizlik çözümü sağlamıştır. Yakınsama süresini kısaltmak amacıyla araştırmacılar bu alana yoğunlaşmışlardır. Wide-Lane ve Narrow-Lane belirsizliklerin hızlı çözümü için üç frekanslı (L_1, L_2 ve L_5) uyduların geliştirilmesi ile buna bağlı olarak Extra-Wide-Lane ve Medium-Wide-Lane gibi yeni lineer kombinasyonlar oluşturulmuştur. Belirsizlik çözümünde fonksiyonel modeli yansıtan durum vektörünün kestirimi için Kalman filtreleme kullanılmaktadır. Durum vektörünün oluşturulmasında Kalman filtreleme yönteminin kilit rol oynadığı belirtilmektedir (Laurichesse ve Privat, 2015). Burada Medium-Wide-Lane belirsizliğinin IF kombinasyonu ile, Extra-Wide-Lane belirsizliğinin MW kombinasyonları ile giderildiği ifade edilmiştir (Laurichesse & Blot, 2016). CNES, 2015 yılında yine üç frekanslı alıcılar ile PPP de tamsayı belirsizliği çözümü için yeni bir açık kaynaklı (C++ dilinde) uygulama önermiştir. Önerilen uygulamanın fonksiyonel modeli hem fark alma yöntemi kullanmaksızın (undifferenced) hem de yörünge saat ürünlerini birleştirmeyen (uncombined) bir yapıdadır (Laurichesse ve Privat, 2015). "Uncombined" bir fonksiyonel modele sahip olduğu için tamsayı belirsizliği çözümünde hem üç frekanslı hem de çift frekanslı sisteme uyumludur (Laurichesse & Blot, 2016). Li vd. (2016) çalışmasında belirsizlik çözümü için dünya çapında PPP kullanıcılarına açık erişimli FCB ürünleri yayınlamaya başladıklarını duyurmuşlardır. Ayrıca çalışmalarında üretilen FCB ürünlerinin kestirilmesinin model ve stratejilerini aktarmışlardır. Kestirilen FCB değerleri CNES tarafından üretilen FCB değerleri ile karşılaştırılarak PPP-AR çözümlerine etkisi araştırılmıştır. Statik PPP'nin Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat RMS (Root Mean Square) değerleri cm biriminde sırasıyla 3.6, 1.4, 3.6'dan 2.0, 1.0, 2.7 ye geliştirilmiştir (Li vd., 2016). Üretilen FCB değerlerinin doğruluk performansının kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir. PPP-AR başarısının kilit noktası belirsizlikten FCB etkisini çıkarmaktır. Bu sayede belirsizliğin tamsayı özelliğine ulaşılabilir (Li vd., 2016). Laurichesse & Banville (2018) çalışmasında çoklu-GNSS yapısının PPP tekniğinin yakınsama süresinin azalmasında kilit rol oynadığı vurgulanmıştır. Özellikle uydu sistemlerinin homojen dağılımı ve çoklu frekans yapılanmasının

belirsizlik çözümü performansını arttırdığı gözlenmiştir. Uyduların homojen dağılım göstermesi üç boyutlu (Kuzey, Doğu, Yukarı) konum belirlemede tamsayı belirsizliği çözümüne olumlu yönde katkı sağlamıştır (Laurichesse & Banville, 2018). Araştırmacılar tarafından günden güne gelişen PPP tamsayı belirsizliği çözümü kestirim algoritmalarının geliştirilmesiyle gelecekte RTK hassasiyetinde anlık konum üretebilmesi beklenmektedir (Laurichesse & Banville, 2018). Gerekli donanımsal koşullar oluşturulduktan sonra taşıyıcı dalga fazının tamsayı değerini bozan parametreler kullanılan kestirim algoritmaları ile geliştirilebilirse istenilen hız ve hassasiyette sonuçlar üretilebilir. Bununla birlikte matematiksel modelde (fonksiyonel model ve stokastik model) kullanılacak yöntemler tamsayı belirsizliğini etkileyebilir.

Shi (2012) doktora tez çalışmasında DCM, SDBS ve PCM tamsayı belirsizliği çözümleri hakkında literatürde detaylı karşılaştırmaların olmadığını belirtmiştir. Shi ve Gao (2014) çalışmasında DCM modeli (Collins, 2008), SDBS modeli (Ge vd., 2008) ve PCM modelini (Laurichesse vd., 2009) PPP tekniğinde tamsayı belirleme kriteri üzerinden karşılaştırılmıştır. MW kombinasyonları ve IF kombinasyonları kullanılan bu üç yöntemde de faz belirsizlikleri tamsayı değerleri çözümünde eşdeğer sonuçlar üretmiştir (Shi & Gao, 2014). Üretilen sonuçlar yakınsama süresini azaltması ve konum belirleme doğruluğunu geliştirmesi yönüyle başarılar göstermesine rağmen, bu üç model için hala kısıtlamalardan bahsedilmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez kapsamında PPP tekniği özelinde GNSS alıcılarının yakınsama süresini etkileyen ve buna bağlı olarak konum hassasiyetini etkileyen hata parametrelerinden tamsayı belirsizliği üzerine analizler gerçekleştirilmiştir. Geleneksel PPP, PPP-AR ve RT-PPP (Real Time PPP) tekniklerinde tamsayı belirsizliği problemini ortaya koyabilmek amacıyla farklı uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar ile farklı tekniklerin yakınsama süresi ve konum doğruluğu yönünden tamsayı belirsizliği hatasından olumsuz etkilendiği ortaya konulmak istenmiştir. Bu kapsamda faz sinyalini etkileyen her parametre tamsayı belirsizliği çözümünün konusu içerisinde dikkate alınmalıdır. Faz sinyallerini etkileyen uydu faz kayıklıkları kestirilerek tamsayı belirsizliğinden

ayırmak gerekecektir. Böylece literatürdeki faz kayıklık ürünlerini kestiren modeller kullanılarak PPP ve PPP-AR çözümlerinin yapılması, mevcut modellerin tamsayı belirsizliği başarısının ortaya konulması ve makine öğrenmesi algoritmaları ile farklı kestirim yöntemleri irdelenmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Bu tez kapsamında GPS tamsayı belirsizliği çözüm problemi incelenmiştir. Tez çalışmasında PPP, PPP-AR ve RT-PPP, teknikleri üzerinden çözümler gerçekleştirilmiştir. Özellikle PPP-AR çözümlerinde literatürde bulunan FCB kestirim modelleri Python ile geliştirilerek yakınsama süresinin azaltılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda kurulan hipotezler aşağıda sıralanmıştır:

- WUHAN, CODE, CNES, JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) ve GRG (Groupe de Recherche en Géodésie Spatiale) servislerinden elde edilen ürünler ile üretilen tamsayı belirsizlik çözümlerinin, PPP tekniği ile üretilen tamsayı belirsizlik çözümünden daha iyi sonuçlar vermesi beklenmektedir. Bununla birlikte servislerden WUHAN servisinin daha fazla sinyalde faz sinyal kayıklık üretmesi sebebiyle diğer servislere göre tamsayı belirsizlik çözümlerinde daha iyi sonuç vereceği düşünülmektedir.
- SDBS modelinde Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB kestirim aşamasına rastgele orman algoritması, destek vektör makinaları algoritması, karar ağaçları algoritması ve K-en yakın komşuluk algoritması uygulayarak yakınsama süresinde kısalma beklenmektedir. Bununla birlikte konum doğruluğunda artış beklenmektedir.
- SDBS modelinde Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB kestirim aşamasına Robust yöntemlerden medyan yöntemi uygulayarak yakınsama süresinde iyileşme ve konum doğruluğunda artış beklenmektedir.

2
GNSS TEMELLERİ

Navigasyon uyduları kullanılarak yeryüzünde bir noktanın konumunun belirlenmesi iki temel kritere bağlıdır. Bunlardan ilki referans kabul edilen uydu konum bilgisi, ikincisi ise uydu ile alıcı arasındaki mesafenin kestirilmesidir. Uydu konum bilgisi belirlendikten sonra uydu-alıcı arasındaki mesafe kestirimi için kod ve faz sinyalleri ile üretilen ölçüler kullanılır.

2.1 Kod Ölçüsü

Navigasyon uyduları tarafından $f_0 = 10{,}23$ MHz temel frekansında c ışık hızında kesikli sinyaller (dijital sinyal) yayınlanmaktadır (Blewitt, 1997). Uydu alıcı arası mesafenin dijital sinyaller kullanılarak kestirilmesine kod ölçüleri denir. Bu sinyaller RINEX (Receiver Independent Exchange Format) gözlem dosyası içerisinde kullanıcılara sunulan, C1 ve C2 kodları 293,1 metre dalga boyuna sahip sivil kullanıcılar için tasarlanmış kod ölçüleridir. P1 ve P2 kodları 29,31 metre dalga boyuna sahip askeri ve özel kullanıcılar için tasarlanmış kod ölçüleridir. C kod ölçüleri L_1 taşıyıcı sinyal ile modüle edilirken, P kod ölçüleri L_1 ve L_2 taşıyıcı sinyal ile modüle edilir. Fakat modülasyon gerçekleşmeden de kod ölçüleri üzerinden düşük hassasiyetlerde alıcı konumu üretilmesi mümkündür.

Kod ölçüsünde alıcı ve uydu saatleri aynı zaman sistemine dönüştürülür ve uydudan çıkan sinyalin alıcıya ulaşıncaya kadar ki seyahat süresi hesaplanır. Sinyal seyahat süresi için alıcı ile uydular arasındaki mesafe zamanın bir fonksiyonu olarak yazılıp incelenirse yaklaşık mesafe ortaya konulur.

$$R = (T - T^s)c \tag{2.1}$$

Denklem (2.1)'de R olarak verilen mesafe görünür mesafeyi (Pseudo-Range) ifade eder. Başka bir ifade ile geometrik mesafe değildir. Çünkü uydu alıcı saatleri arasında atomik saatler sebebiyle senkronizasyon hatası bulunur. Senkronizasyon hatası da pseudo-range ile geometrik mesafe arasındaki farkı oluşturur. Sinyal çıkışı ve alıcıya girişi arasındaki seyahat süresi senkronizasyon hatası dikkate alınarak T^s ve T belirlenebilir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta T alıcı saati tarafından

verilen zaman ölçeğinde hesaplanmış sinyal alınma zamanı ve T^s uydu saati tarafından alınan zaman ölçeğinde hesaplanmış sinyal çıkış zamanıdır. T ve T^s sırasıyla koordinatlandırılmış evrensel zaman (UTC: Coordinated Universal Time) ve uluslararası atomik zaman (TAI: International Atomic Time) gibi iki farklı zaman sistemindedir. Navigasyon mesajı ile iletilen T^s (Hofmann-Wellenhof vd., 2007) ve T alıcı saatinin aynı zaman sistemine dönüştürülmesi gerekir. Dönüşümün dışında her iki saat sistemine de ayrıca düzeltme getirilmesi gerekmektedir (Blewitt, 1997). Uydu ve alıcı zamanlarına sırasıyla ς^s ve ς kadar düzeltme getirilir.

$$T^s = t^s - \varsigma^s \tag{2.2}$$

$$T = t - \varsigma \tag{2.3}$$

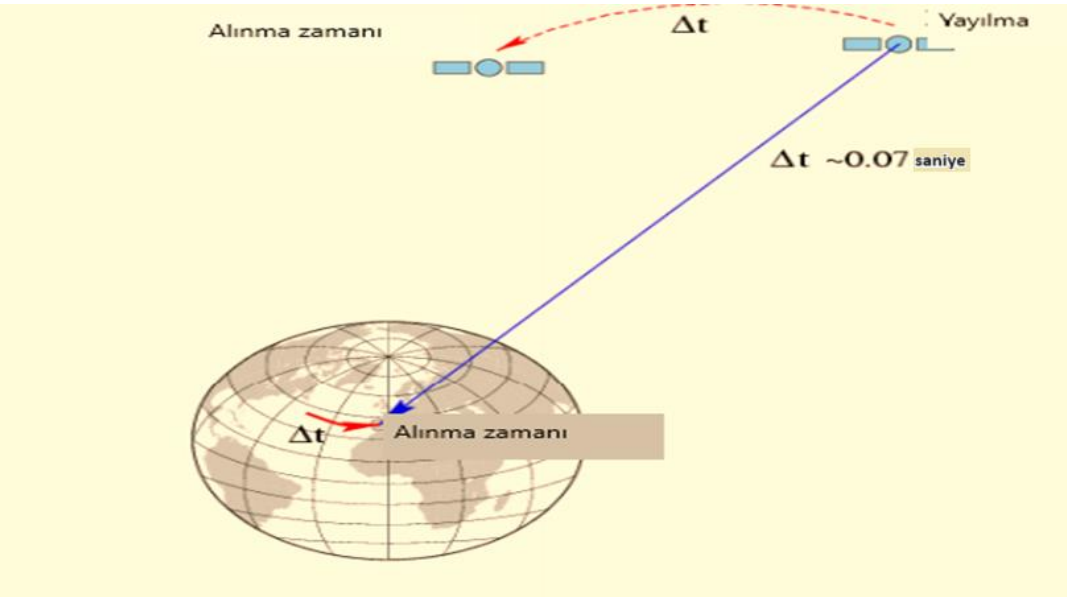
Uydudan çıkan sinyal alıcıya gelene kadar belirli bir seyahat süresine maruz kalır. Seyahat süresi yaklaşık 0.06 saniye ve 0.10 saniye arasında değişir. Sinyal seyahat süresince uydunun konum değişikliği, alıcı konumunu yaklaşık 60 metre bozabilir (Hofmann-Wellenhof vd., 2007). Bu sebepten uydu alıcı arasındaki R mesafesi uydu saat sistemindeki t^s ve alıcı saat sistemindeki t ile ilişkilidir. Öncelikle aradaki zaman sistemi farkını gidermek için denklem (2.1)'deki T^s yalnız bırakılarak denklem (2.4) oluşturulur.

$$T^s = T - \left(\frac{R}{c}\right) \tag{2.4}$$

Denklem (2.2)'deki T^s ifadesi denklem (2.4)' de yerine yazılırsa denklem (2.5) oluşturulur.

$$t^s = T - \left(\frac{R}{c}\right) + \varsigma^s \tag{2.5}$$

Burada T alıcı zamanı, R gözlem dosyasından alınan uydu alıcı arası mesafe, c ışık hızı ve ς^s uydu saat hata değeridir. Uydunun sinyali yayınladığı t^s zamanı ile alıcıya ulaştığı t zamanı süresince uydu yaklaşık 300 metre daha hareket edebilecektir. Aynı seyahat süresi boyunca dünya da kendi ekseni etrafında hareket etmektedir. Bu sebepten t^s zamanında uydu koordinatları ile t zamanında uydu koordinatları aynı olmayacaktır. Bu ifade Şekil 2.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Uydudan çıkış zamanı ve alıcıya giriş zamanı (Subirana vd., 2013)'den değiştirilerek kullanılmıştır.

Konveksiyonel yersel sistemde (CTS: Conventional Terrastial System) t^s anındaki koordinatları $(X^{sat}, Y^{sat}, Z^{sat})_{t^s}$ olsun. Uydunun t anındaki koordinatları seyahat süresi ve dünya rotasyonu hesaba katılarak üretilen bir dönüşüm matrisi sayesinde $(X^{sat}, Y^{sat}, Z^{sat})_t$ şeklinde hesaplanır.

$$(X^{sat}, Y^{sat}, Z^{sat})_t = \begin{bmatrix} \cos\omega_E \triangle t & \sin\omega_E \triangle t & 0 \\ -\sin\omega_E \triangle t & \cos\omega_E \triangle t & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (X^{sat}, Y^{sat}, Z^{sat})_{t^s} \qquad (2.6)$$

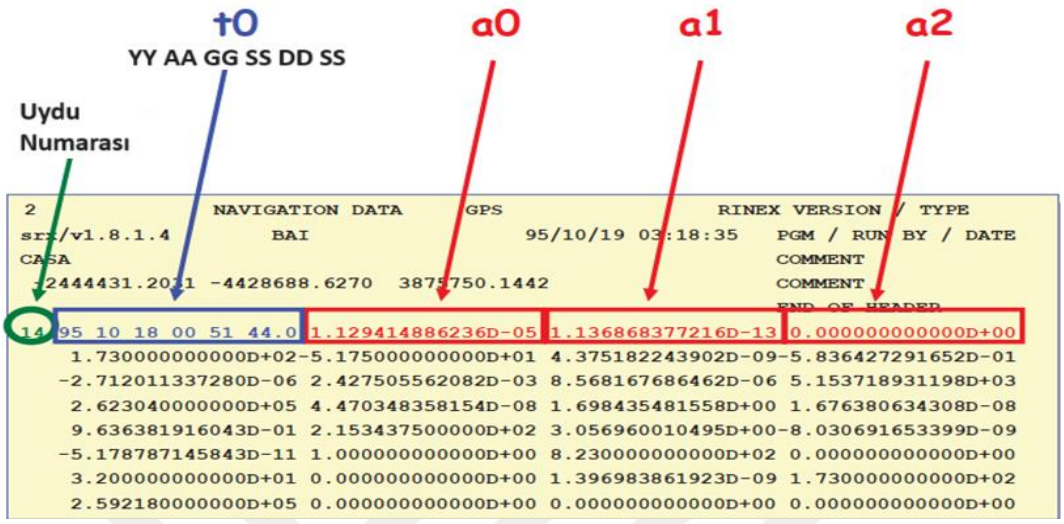
Denklem (2.6) da gösterilen $(X^{sat}, Y^{sat}, Z^{sat})_{t^s}$ değeri yayın efemerisinden (Broadcast Efemeris) hesaplanabilir ya da IGS, CODE (Centre for Orbit Determination in Europe), ESA GFZ, NGS (National Geodetic Survey), SIO (Scripps Institution of Oceanography) gibi servisler tarafından yayınlanan hassas efemeris dosyasından (Precise Efemeris .sp3) elde edilebilir. "Uydu Koordinatlarının Yayın Efemeris Dosyasından Hesaplanması" başlığı altında yapılmıştır.

2.1.1 Uydu Saat Hatasının Hesabı

Denklem (2.5)'de bulunan saat hatası değerleri τ^s, Denklem (2.7) ile navigasyon mesajındaki bilgiler kullanılarak hesaplanabilir.

$$\tau^s = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 \qquad (2.7)$$

Denklem (2.7)'de verilen eşitliğin sağ tarafındaki ifadeler Şekil 2.2'de verilmiştir. (t: Ölçü epoğu, t_0: efemeris zamanı, $a_{0,1,2}$:Navigasyon dosyasında ilk satırdaki verilerdir.)



Şekil 2.2 Uydu saat hatasının hesaplanması için navigasyon dosyası içindeki veriler (Subirana vd., 2013)

Uydu saat hatası, uydunun rölativesinden de etkilenmektedir. Bunun için Δt_{ref} olarak ifade edilen rölativistik etki fonksiyonel modele eklenerek Denklem (2.8) oluşturulur.

$$\tau^s = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2 + \Delta t_{ref} \tag{2.8}$$

Rölativistik etki, gözlenen uydu yörüngesinin büyük yarı ekseninin (a) değerine, onun eksentrisitesine (e) ve eksentrisite anomali değerine (E) göre uydudan uyduya farklılaşır. Bu a ve e ifadesi navigasyon mesajı içerisinde verilir. E ifadesinin iteratif çözüm ile hesaplanması gerekir.

$$\Delta t_{ref} = -2\frac{\sqrt{\mu a}}{c^2} e \sin(E) \tag{2.9}$$

Denklem (2.9)'da verilen değerler $\mu = 3.986005x10^{14}\ m^3/sn^2$ evrensel gravite sabiti ve $c = 299792458\ m/sn$ ışık hızı olarak alınır. Sabit değerler F olarak ifade edilirse $F = -4.442807633393060\ x10^{-10}\ s/m^{0.5}$ Denklem (2.10) oluşturulur.

$$\Delta t_{ref} = F\sqrt{a} \sin(E) \tag{2.10}$$

Newton'un metoduna göre E'nin hesaplanması için öncelikle ortalama anomali değerinin (M_k) hesaplanması gerekecektir. Ortalama anomalinin bulunması için bağıntılar Denklem (2.11), (2.12) ve (2.13) de verilmiştir.

$$M_k = M_0 + (n_0 + \Delta n)t_k \tag{2.11}$$

$$n_0 = \sqrt{\mu/a^3} \tag{2.12}$$

$$t_k = t^s - t_{0e} \tag{2.13}$$

M_0, $\Delta n, t^s$ve t_{0e} değerleri navigasyon mesajından alınabilir. Newton tarafından önerilen eksentrisite anomali iterasyon çözümü Denklem (2.14)'de gösterilmiştir.

$$E_{0,i+1} = E_i - \frac{E_i - e\sin(E_i) - M_k}{1 - e\cos(E_i)} \qquad E_0 = M_k \tag{2.14}$$

Borre vd. (2007) tarafından önerilen metot Denklem (2.15)' de ifade edilmiştir.

$$E_{0,i+1} = M_k + e\sin(E_i) \qquad E_0 = M_k \tag{2.15}$$

E hesaplandıktan sonra Denklem (2.10) bağıntısındaki ifadeler yerine yazılırsa Δt_{ref} bulunmuş olur. Δt_{ref}, Denklem (2.8) bağıntısında yerine yazılarak uydu saat hata değerine ulaşılır. Navigasyon dosyasındaki veriler kullanılarak hesaplanabilen uydu saat hata değeri IGS servisi tarafından yayınlanan .clk uzantılı dosyadan da elde edilebilir. Bunun dışında yine IGS tarafından hassas efemeris dosyasından da elde etmek mümkündür. Bu tez kapsamında uydu saat hata değerleri hassas efemeris dosyasından lineer regresyon kullanılarak üretilmiştir. Uydu saat hata değeri üretildikten sonra Δt_{ref} eklenmiştir. Uydu koordinatlarının enterpolasyon ile elde edilmesi başlığı altında anlatılmıştır.

Denklem (2.2) ve (2.3)'deki uydu saat hata değeri hesaplandıktan sonra Denklem (2.1)'de bağıntıda yerine yazılırsa Denklem (2.16) ve (2.17) üretilir.

$$R = \big((t - \varsigma_r) - (t^s - \varsigma^s)\big)c \tag{2.16}$$

$$R = (t - t^s)c + (\varsigma_r - \varsigma^s)c \tag{2.17}$$

Denklem (2.17) bağıntısındaki $(t - t^s)c$; ifadesi yerine $\rho^s(t, t^s) = (t - t^s)c$ yazılarak Denklem (2.18) ifadesi elde edilir.

$$R = \rho^s(t, t^s) + \left(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}\right)c \tag{2.18}$$

2.1.2 Uydu Koordinatlarının Hesaplanması

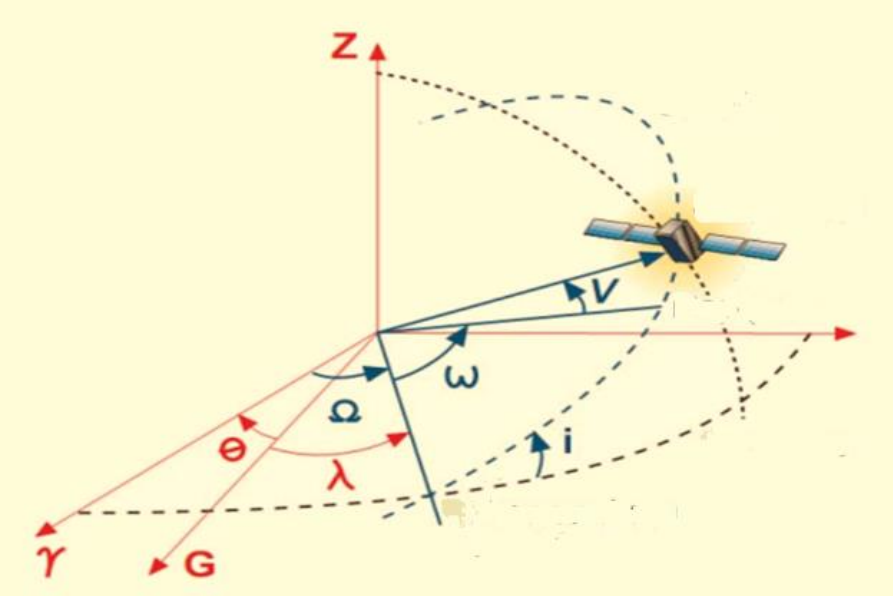
2.1.2.1 Uydu Koordinatlarının Yayın Efemeris Dosyasından Hesaplanması

Denklem (2.18) bağıntısındaki $\rho^s(t, t^s)$ ifadesi uydu alıcı arası kaba mesafeyi temsil eder ve Pisagor teoremine göre açılarak Denklem (2.19) oluşturulur. Denklem (2.19) bağıntısındaki ifade Denklem (2.18)'de yerine yazılarak Denklem (2.20) oluşturulur.

$$\rho^s(t, t^s) = \sqrt{\left(x^s(t^s) - x(t)\right)^2 + \left(y^s(t^s) - y(t)\right)^2 + \left(z^s(t^s) - z(t)\right)^2} \tag{2.19}$$

$$R = \sqrt{(x^s(t^s) - x(t))^2 + (y^s(t^s) - y(t))^2 + (z^s(t^s) - z(t))^2} + \left(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}\right)c \tag{2.20}$$

Denklem (2.20)'de uydu saat hatası (ς^s) yukarıdaki denklemler ile hesaplanırken alıcı saat hatası (ς) bilinmeyen olarak çözüme girer. $x^s(t^s), y^s(t^s), z^s(t^s)$ uydu konum bilgilerini ifade ederken $x(t), y(t), z(t)$ alıcı konum bilgilerini ifade etmektedir. Uydu konum bilgileri $x^s(t^s), y^s(t^s), z^s(t^s)$ navigasyon mesajı içerisinde verilen Kepler elemanları kullanılarak $(a, e, i, \omega, \Omega, v_k)$ hesaplanabilir. Kepler Elemanları Şekil 2.3'da gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Kepler elemanları (Subirana vd., 2013)

Şekil 2.3'da verilen kepler elemanları $(a, e, i, \omega, \Omega, v_k)$ sırasıyla büyük yarı eksen, eksentrisite, eğim, uydu yörüngesinin yakınlık açısı, yatay açı, doğru anomali olarak tanımlanır. Şekil 2.4'de bir uyduya ait navigasyon mesajı içerisinde kepler elemanları gösterilmiştir.

```
     2              NAVIGATION DATA     GPS                 RINEX VERSION/ TYPE
XPRINT v1.1         gAGE                00/08/17 09:31:37   PGM / RUN BY / DATE
gAGE BROADCAST EPHEMERIS FILE                               COMMENT
   +1.7695E-08 +2.2352E-08 -1.1921E-07 -1.1921E-07          ION ALPHA
   +1.1878E+05 +1.4746E+05 -1.3107E+05 -3.2768E+05          ION BETA
   +1.955777406693E-08+1.598721155460E-14   405504     1064 DELTA_UTC: A0,A1,T,W
    13                                                      LEAP SECONDS
                                                            END OF HEADER

03 00  5 30 10  0 40.0+7.855705916882E-06+3.524291969370E-12+0.000000000000E+00
   +1.010000000000E+02+6.500000000000E+01+5.456298524109E-09+5.530285585107E-01  Mo
   +3.475695848465E-06+1.308503560722E-03+2.641230821609E-06+5.153678266525E+03  e, √a
   +2.088000000000E+05+1.117587089539E-08+7.472176136643E-01-1.862645149231E-09  TOE,Ω
   +9.412719852649E-01+3.163750000000E+02+1.125448382894E+00-8.826796182859E-09  io, ω
   +1.239337382719E-10+1.000000000000E+00+1.064000000000E+03+0.000000000000E+00
   +4.000000000000E+00+0.000000000000E+00-4.190951585770E-09+6.130000000000E+02  TGD
   +2.044980000000E+05+0.000000000000E+00+0.000000000000E+00+0.000000000000E+00
```

Şekil 2.4 Navigasyon dosyası içeriği (Subirana vd., 2013)

Navigasyon mesajından alınan Kepler elemanları Denklem (2.21), (2.22), (2.23), (2.24), (2.25), (2.26), (2.27) bağıntılarında yerine yazılarak uydu koordinatları hesaplanır.

Doğru anomali için v_k:

$$v_k = \arctan \frac{\sqrt{1-e^2}\sin E_k}{\cos E_k - e} \qquad (2.21)$$

$$\emptyset_k = v_k + \omega$$

Enlem parametresi $u_k{}'nın$ hesaplanması;

$$u_k = \emptyset_k + c_{uc}cos2(\emptyset_k) + c_{us}sin2(\emptyset_k) \qquad (2.22)$$

Dairesel mesafe $r_k{}'nın$ hesaplanması:

$$r_k = a(1 - 2cosE_k) + c_{rc}cos2(\emptyset_k) + c_{rs}sin2(\emptyset_k) \qquad (2.23)$$

Yörünge düzlemi eğimi $i_k{}'nın$ hesaplanması:

$$i_k = i_0 + it_k + c_{ic}cos2(\emptyset_k) + c_{is}sin2(\emptyset_k) \qquad (2.24)$$

Artan düğüm boylamı $\Omega'nın$ hesaplanması:

$$\Omega_k = \Omega_0 + (\Omega - \Omega_E)t_k - \Omega_E t_{0e} \qquad (2.25)$$

Bu hesaplar sonucu CTS koordinat sisteminde üç boyutlu koordinatlar Denklem (2.26) ve (2.27) formülleri ile hesaplanır.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} r_k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (2.26)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{CTS} = \begin{bmatrix} \cos\Omega_k & -\sin\Omega_k & 0 \\ \sin\Omega_k & \cos\Omega_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos i_k & -\sin i_k \\ 0 & \sin i_k & \cos i_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos u_k & -\sin u_k & 0 \\ \sin u_k & \cos u_k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_k \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (2.27)$$

Denklem (2.27) ile uydu koordinatlarının navigasyon mesaj dosyasından hesaplanabileceği gösterilmiştir. Ancak navigasyon mesaj dosyası her uydu için 2 saatlik periyotlarda bilgileri yayınlar. Bu durum uydu koordinatlarının hassasiyetini bozmaktadır. Bu yönüyle tez çalışmasında uydu koordinatları bulunurken hassas efemeris verilerine Lagrange enterpolasyonu uygulanmıştır.

2.1.2.2 Uydu koordinatlarının enterpolasyon ile elde edilmesi

Uydu koordinat değerleri ve uydu saat hata değeri hassas efemeris dosyasında yayınlanmış uydu koordinatlarından kestirilebilir. Hassas efemeris .sp3 uzantılı dosya olarak IGS, CODE, ESA, GFZ, NGS ve SIO gibi servisler tarafından farklı hassasiyetlerde ve farklı zaman aralıklarında yayınlanır.

Hassas efemeris dosyasının 24 saatlik verisi her uydu koordinatı için servisler tarafından 5 ya da 15 dakikalık örneklem aralığında yayınlanır. Bu tez kapsamında IGS hassas yörünge ürünleri kullanılmıştır. IGS hassas yörünge ürünleri üzerinden her saniye için uydu koordinatlarının veri setinden kestirilmesi gerekecektir. Bu tez çalışmasında uydu koordinatlarının t anındaki koordinatlarının kestirimi için enterpolasyon yöntemlerinden Lagrange Enterpolasyonu kullanılmıştır.

- **Lagrange Enterpolasyonu**

Lagrange bir veri setinden kestirim yaparak değer üreten enterpolasyon algoritmasıdır. Enterpolasyonda veri setindeki noktalara göre eğri uydurma işlemi gerçekleştirilir. İlgili veri setinde hata oranı düşük ise regresyon yerine enterpolasyon tercih edilir. Lagrange enterpolasyonunda derece çok önemli bir girdidir. Birinci dereceden Lagrange enterpolasyonu için iki veri bulunur. Basit olarak ifade edilecek olursa $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ noktalarından geçen eğriyi belirlemek için Denklem (2.28)'deki ifade kullanılır.

$$f(x) = y = a_1(x - x_1) + a_2(x - x_2) \tag{2.28}$$

Denklem (2.28)'de a_1 ve a_2 katsayılarını x ve y cinsinden yazdırabilmek için x_1, y_1 ve x_2, y_2 yi sırasıyla yerine yazılırsa Denklem (2.29) ve (2.30) üretilir.

$$y_1 = a_1(x_1 - x_1) + a_2(x_1 - x_2) \qquad y_2 = a_1(x_2 - x_1) + a_2(x_2 - x_2) \tag{2.29}$$

$$a_1 = \frac{y_1}{x_1 - x_2} \qquad \text{ve} \qquad a_2 = \frac{y_2}{x_2 - x_1} \tag{2.30}$$

$a_1$ve a_2 katsayılarını Denklem (2.28)' de yerine yazılırsa Denklem (2.31) üretilir. İki ölçü ile birinci dereceden Lagrange fonksiyonuna ulaşılmış olur.

$$f(x) = \frac{y_1}{x_1 - x_2}(x - x_1) + \frac{y_2}{x_2 - x_1}(x - x_2) \tag{2.31}$$

İkinci dereceden Lagrange denklemi için $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ gibi üç verinin bilinmesi gerekir.

$$f(x) = y = a_1(x - x_2)(x - x_3) + a_2(x - x_1)(x - x_3) + a_3(x - x_1)(x - x_2) \tag{2.32}$$

a_1, a_2 ve a_3 katsayılarını x, y cinsinden ifade edebilmek için Denklem (2.32)'da $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ sırasıyla yerine yazılırsa Denklem (2.33) seti oluşturulur. Buna bağlı olarak a_1, a_2 ve a_3 ifadeleri yalnız bırakılırsa Denklem (2.34) oluşturulur.

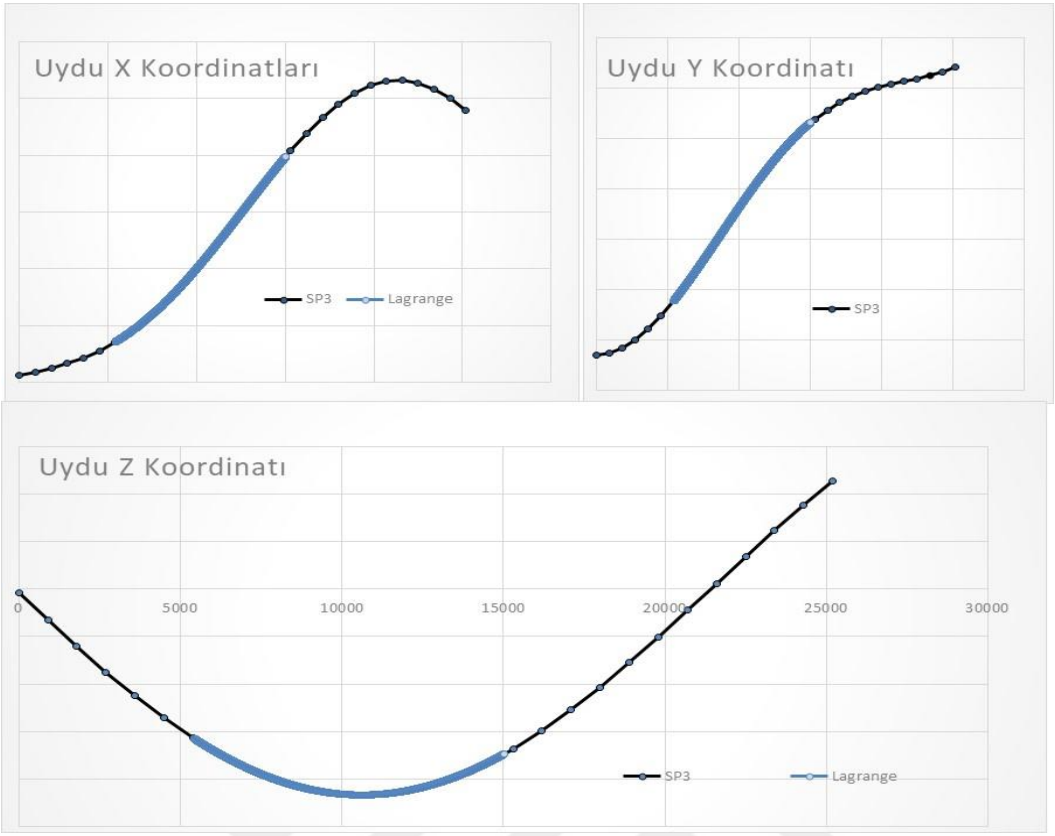
$$\begin{aligned} y_1 &= a_1(x_1 - x_2)(x_1 - x_3) + a_2(x_1 - x_1)(x_1 - x_3) + a_3(x_1 - x_1)(x_1 - x_2) \\ y_2 &= a_1(x_2 - x_2)(x_2 - x_3) + a_2(x_2 - x_1)(x_2 - x_3) + a_3(x_2 - x_1)(x_2 - x_2) \\ y_3 &= a_1(x_3 - x_2)(x_3 - x_3) + a_2(x_3 - x_1)(x_3 - x_3) + a_3(x_3 - x_1)(x_1 - x_2) \end{aligned} \tag{2.33}$$

$$a_1 = \frac{y_1}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)}, \; a_2 = \frac{y_2}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)}, \; a_3 = \frac{y_3}{(x_3 - x_1)(x_1 - x_2)} \tag{2.34}$$

Bulunan a_1, a_2 ve a_3 değerleri Denklem (2.32)'de yerine yazılırsa Denklem (2.35)'da Lagrange 2. dereceden fonksiyonu elde edilmiş olur.

$$f(x) = \frac{(x - x_2)(x - x_3)}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)} y_1 + \frac{(x - x_1)(x - x_3)}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)} y_2 + \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_3 - x_1)(x_1 - x_2)} y_3 \tag{2.35}$$

Lagrange denklemi için her derecede farklı bir denklem yapısı oluşturulur. Bu denklem yapısı oluşturulurken uydu koordinatlarının en hassas enterpole edildiği dereceden bir fazla veri seçilmelidir. Bu tez çalışmasındaki Lagrange denkleminin birçok derecesi test edilmiştir. Böylece en doğru yörünge koordinatlarına 9. Dereceden Lagrange denklemi ile ulaşılmıştır. Şekil 2.5'de gösterildiği gibi Lagrange interpolasyonu ile uydu koordinatları bulunmuştur.

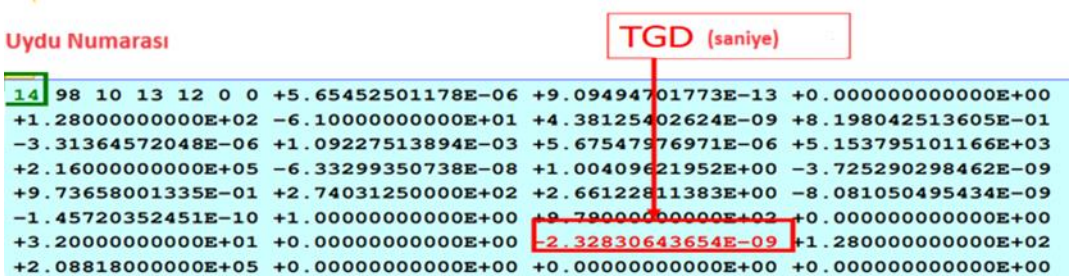


Şekil 2.5 Lagrange enterpolasyonu ile uydu koordinatlarının eğrisi

2.1.3 TGD (Total Group Delay)'nin Fonksiyonel Modele Eklenmesi

R kod ölçü mesafesini etkileyen donanımsal gecikme (Instrumental Delay) veya diferansiyel grup gecikmesi olarak bilinen bir başka hata parametresi bulunur. Hem alıcı hem uyduda kullanılan bazı filtreler, kablolar veya antenler söz konusu gecikmeye neden olabilir. Fonksiyonel model çözümüne $K_{rec}^{sat} = K_{rec} - TGD^{sat}$ olarak dahil edilir. K_{rec} değeri alıcı saat hata değeri içerisinde bulanacağı için sıfır olarak kabul edilebilir. TGD^{sat} değeri ise her uydu için hesaplanarak navigasyon mesajı içerisinde saniye biriminde kullanıcılara gönderilir. Şekil 2.6'da TGD değerinin navigasyon mesajındaki basamağı gösterilmiştir. Bu değer hem kod hem de faz ölçülerinin fonksiyonel model çözümüne Denklem (2.36)'da ifade edildiği gibi eklenir.

$$R = \rho^s(t, t^s) + c\left(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}\right) + TGD \qquad (2.36)$$



Şekil 2.6 Navigasyon mesajında gösterilen TGD değeri (Subirana vd., 2013)

Navigasyon mesajında her uydu için iki saatlik periyotlarda veri üretilmektedir. PPP tekniğinin IF kombinasyonunda TGD hatası giderildiği için geleneksel PPP çözümünün fonksiyonel modeline eklenmez.

2.1.4 Atmosferik Etkilerin Fonksiyonel Modele Eklenmesi

R kod ölçüsünü etkileyen bir diğer etki troposferik ve iyonosferik etkidir. Troposfer yeryüzünden yaklaşık 60 km yüksekliğe kadar olan atmosferik katmandır. Troposferik gecikme doğrudan frekanslara bağlı değildir. Sıcaklık, basınç ve nem gibi farklı parametrelere göre değişim gösterir. Hem kod hem de taşıyıcı faz ölçülerinde gecikmelere sebep olur. $Trop_{rec}^{sat}$ olarak ifade edilen troposferik gecikme, kuru gecikme d_{dry} ve ıslak gecikme d_{wet} olarak modellenir. Bu aşamada $elev$ olarak ifade edilen uydu yükseklik açısı da kullanılır. Bu model Denklem (2.37) ve (2.38)'de gösterilmiştir (Hofmann-Wellenhof vd., 1997).

$$Trop_{rec}^{sat} = \left(d_{dry} + d_{wet}\right) m(elev) \tag{2.37}$$

$$m(elev) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + sin^2(elev)}}; \quad elev = 20.57\frac{\pi}{180} \tag{2.38}$$

Rölatif konum belirlemede baz uzunluğunun kısa olduğu yerlerde troposferik hata kod ve faz ölçüleri için göz ardı edilebilir. Ancak iyonosferik hata için aynı durumu söylemek mümkün değildir. PPP tekniği kullanılarak konum belirlemede ise kod ve faz kombine edilmiş ölçüler için troposferik ve iyonosferik hataların tespiti önemlidir.

İyonosfer, atmosfer tabakasının yaklaşık 60 km ila 2000 km'ye kadar olan mesafe olarak bilinir. İyonosferdeki yoğun elektron katmanı kod ve taşıyıcı faz ölçülerini farklı şekilde etkiler. Bu sebeple iyonosferdeki serbest iyon miktarı sırasıyla geciktirme ve ilerletme olarak kod ve faz ölçülerini etkileyecektir. İyonosfer

tabakasının sinyaller üzerindeki etkisi GIM (Global Ionosphere Model) veya IF kombinasyonu kullanılarak giderilmeye çalışılır (Cai vd., 2017). Denklem (2.39)'de iyonosfere ait fonksiyonel model ifade edilmiştir.

$$Ion_{L1\,rec}^{\;sat} = \frac{40.3}{{f_1}^2} STEC \tag{2.39}$$

Denklem (2.39)'deki $STEC$ (Slant Total Electron Content) simgesi elektron yoğunluğunu temsil eder ve Denklem (2.40)'de çözüm ifadesi gösterilmiştir.

$$STEC = \int_{rec}^{sat} N_e \, ds \tag{2.40}$$

Faz ve Kod Ölçüleri için IF Kombinasyonu başlığı altında IF kombinasyonu olarak detaylandırılacaktır. IF kombinasyonu kullanılarak çift frekanslı alıcılar ile iyonosferik etki %99.9 oranında giderilir (Subirana vd., 2013).

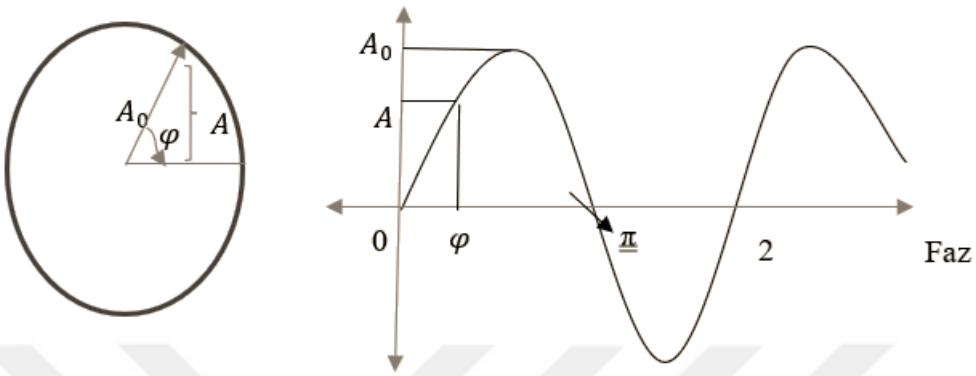
Farklı hata parametrelerinin hesaplanması sonucu uydu alıcı arasındaki mesafe Denklem (2.41) bağıntısında ifade edilmiştir. Kod ölçüsünün mesafe denklemine eklenen Z_r^s ifadesi troposfer gecikmesi, I_r^s ifadesi iyonosfer gecikmesi, ε ise diğer hata kaynaklarını içermektedir.

$$R = \rho^s(t, t^s) + c\left(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}\right) + Z_r^s + I_r^s + TGD + \varepsilon \tag{2.41}$$

2.2 Taşıyıcı Faz Ölçüsü

Dijital/kesikli sinyallerin yerine analog/sürekli sinyaller kullanılarak uydu alıcı arası mesafenin kestirilmesine faz ölçüleri denir (Blewitt, 1997; Hofmann-Wellenhof vd., 2007). Yaklaşık 20200 km yükseklikte belirli bir yörüngede dönen navigasyon uyduları spesifik frekanslarda yayın yaparlar. Elektromanyetik spektrumda hiçbir frekans band aralığı, navigasyon uydularının kriterlerine tam olarak uymaz. Fakat L bandı frekans aralığı yayılma etkisi, sistem tasarımı ve frekans uygunluğu kriterleri yönüyle en iyisi olarak kabul edilmiştir (Hofmann-Wellenhof vd., 2007). Farklı çalışmalarda C bant aralığının navigasyon uyduları için optimum olduğu da söylenmektedir. Navigasyon uydularının temel olarak kriterleri şu şekilde sıralanabilir; yüksek frekans, düşük iyonosfer gecikmesi, serbest alan kaybı minimum ve anten kazancı maksimum.

Bu tez içerisinde φ olarak ifade edilecek olan faz, açısal hız ve zamanın çarpılması ile elde edilen bir değer olması sebebiyle doğrudan frekans ve genlik ile ilişkilidir. Saniye başına düşen döngü olarak ifade edilen frekans, Hertz ya da cps (cycle per second) birimi ile gösterilir (Hofmann-Wellenhof vd., 2007).



Şekil 2.7 Dalga sinyal modeli

Dalga üzerinde bir P noktası belirli bir f frekansında $w = 2\pi f$ açısal hızda hareket eder. Şekil 2.7'de bir fazın matematiksel olarak hareketi gösterilmiştir.

$$\varphi = wt = ft \tag{2.42}$$

Denklem (2.42)'de bir faz, zamanın ve frekansın bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Ancak tek bir epok göz önüne alındığında, faz adeti uydu alıcı arasındaki mesafeye ve dalga boyuna göre değişir. Buna bağlı olarak faz (φ), mesafe (ρ) ve dalga boyuna (λ) göre Denklem (2.43)'de ifade edilmiştir.

$$\varphi = \frac{\rho}{\lambda} \tag{2.43}$$

t_0 anında başlangıç faz ve t anındaki faz farkı zamanın bir fonksiyonu olarak yazılırsa Denklem (2.44) ve (2.45) bağlantıları ortaya koyulur.

$$\varphi(t) - \varphi(t_0) = \int_{t_0}^{t} f\, dt \tag{2.44}$$

$$\varphi = ft - \frac{\rho}{\lambda} \tag{2.45}$$

$\varphi(t)$, t anındaki fazı, $\varphi(t_0)$, t_0 anındaki fazı temsil eder. Denklem (2.45)'de λ ifadesi yerine $\lambda = c/f$ ifadesi yazılırsa Denklem (2.46) bağıntısı ortaya çıkar.

$$\varphi = f\left(t - \frac{\rho}{c}\right) \tag{2.46}$$

Burada t epok zamanı iken, $\rho = ct_\rho$ formülündeki t_ρ sinyalin uydu alıcı arasındaki seyahat zamanıdır. Bu ifadeden yola çıkılarak Denklem (2.47) ortaya çıkarılır.

$$\varphi = f\left(t - t_\rho\right) \tag{2.47}$$

Temel olarak uydunun ürettiği sinyale karşılık bir kopya sinyal (replica signal) alıcı içerisinde üretilir. Uydu sinyal fazı ve alıcı sinyal fazı çakıştırılır. Bu sinyallerin birbiri üzerine bindirilmesi frekanslar farkı ya da fazlar farkı alınarak ifade edilebilir. Bu faz farkı alınan sinyal ile alıcı tarafından üretilen sinyal arasındaki farkı ifade eder. Bu iki sinyal arasındaki fark temel olarak Denklem (2.48) ile gösterilir.

$$T(t) = k(\varphi(t) - \varphi_0) \tag{2.48}$$

Denklem (2.48)'de $\varphi_0 = \varphi(0)$ alıcıya ulaşan fazdır, k kalibrasyon sabiti olarak verilmiştir. Sinüzoidal sinyal dalgasının üzerindeki bir P noktasına ait faz ifadesi Denklem (2.49)'de gösterilmiştir.

$$A(t) = A_0 \sin\left(2\pi\varphi(t)\right) \tag{2.49}$$

Alıcı tarafından oluşturulan kopya sinyal ile alıcıya ulaşan sinyal matematiksel olarak çarpılarak "Beat Signal" oluşur (Blewitt, 1997). Denklem (2.49)'daki bağıntıdan yararlanılarak sinyaller çarpılarak Denklem (2.50) ve (2.51) ifade edilir.

$$R(t)\otimes G(t) = R_0 \sin\left(2\pi\varphi_R(t)\right)\ G_0 \sin\left(2\pi\varphi_G(t)\right) \tag{2.50}$$

$$\begin{aligned} R(t)\otimes G(t) = \frac{R_0 G_0}{2}[\ &\cos\left(2\pi(\varphi_G(t) - \varphi_R(t)\right) \\ &- \cos\left(2\pi(\varphi_G(t) + \varphi_R(t)\right)] \end{aligned} \tag{2.51}$$

$R(t)$ alıcıda üretilen kopya sinyali, $G(t)$ uyduda üretilen sinyali temsil eder. Alıcılar tarafından filtrelenen yüksek frekanslı "Beat Signal" $B(t)$ olarak ifade edilir. (Denklem (2.52), (2.53) ve (2.54))

$$B(t) = Filter\{R(t)\otimes G(t)\} \tag{2.52}$$

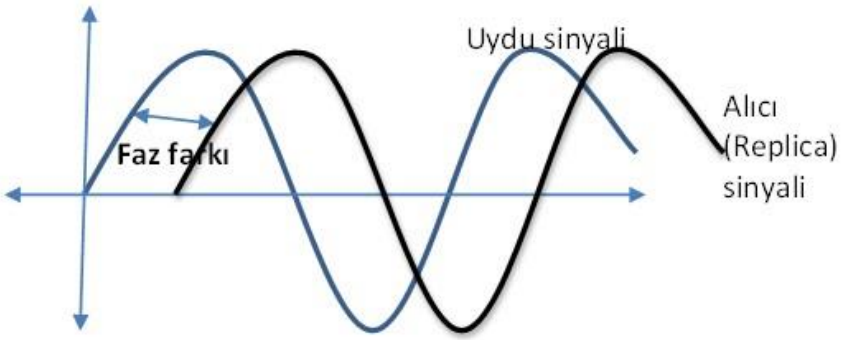
$$B(t) = \frac{R_0 G_0}{2}[\ \cos\big(2\pi(\varphi_G(t) - \varphi_R(t)\big) - \cos\big(2\pi(\varphi_G(t) + \varphi_R(t)\big)] \tag{2.53}$$

$$B(t) = B_0\,[\ \cos\big(2\pi(\varphi_B(t)\big)] \tag{2.54}$$

(2.54) bağıntısında "Beat Sinyalin" fazını temsil eden φ_B, zamanın bir fonksiyonudur. φ_B, t ye göre türevi alınır. Başka bir ifade ile fazın zamana göre türevi ($\frac{d\varphi_B}{dt} = f_B$) frekansı verir (Blewitt, 1997). Bu ifadeden yola çıkarak frekanslar üzerinden f_R alıcı sinyali ile f_G uydu frekansı arasındaki fark frekans farklarını ifade eder. Bu ifade uydudan gelen sinyal ile alıcıdan üretilmiş kopya sinyal arasındaki faz farkının bulunmasını sağlar.

$$f_B = \triangle f = f_G - f_R = -\frac{1}{\lambda_G} v_\rho \tag{2.55}$$

Denklem (2.55)'da f_G yayınlanan frekans, f_R alınan frekanstır. λ_G yayınlanan frekansın dalga boyu iken uydunun alıcıya göre hızı v_ρ olarak ifade edilmiştir.



Şekil 2.8 Alıcı ve uydu sinyali arasındaki faz farkı

Şekil 2.8'de alıcı ve uydu frekanslarında oluşabilecek faz farkı sembolik olarak ortaya konmuştur.

$$\varphi_r^s(t) = \varphi_G(t) - \varphi_R(t) + N \tag{2.56}$$

Denklem (2.56)'de verilen $\varphi_r^s(t)$ ifadesi alıcı tarafından kaydedilen faz değeridir. Alıcı ilk açıldığında anlık kesirli "beat sinyal" fazı ölçülmeye başlanır. Uydu alıcı arasındaki döngünün (cycle) ilk tamsayısı bilinmez. Ancak sinyal kaybı olmadan beat sinyal fazı ölçülmeye devam ettiğinde N olarak sembolize edilen tamsayı

belirsizliği tespit edilir. N ise tam dalga sayısı olarak formüle eklenir. Uydudan çıkan sinyal zamanı ile alıcıya ulaşma anı ölçülerek kaç tam dalga olduğunun bulunması bir mesafe ölçüm (Pseudo-range) tekniğidir. Fakat konum doğruluğu düşüktür.

$$\varphi_R(t) = f_r t - \varphi_0 \tag{2.57}$$

$$\varphi_G(t^s) = f^s t - f^s \frac{\rho}{c} - \varphi_0^s \tag{2.58}$$

Denklem (2.57) ve (2.58)'deki φ_0 başlangıç faz değeridir ve saat hatasından etkilenir. Saat hatası söz konusu olduğu için uydu ve alıcıda farklıdır.

$$\varphi_0^s = -f^s \varsigma^s \tag{2.59}$$

$$\varphi_0 = -f_r \varsigma_r \tag{2.60}$$

Uydudan alınan sinyal ile alıcıda üretilen sinyal Denklem (2.59) ve (2.60) bağıntısına göre sinyal farkı güncellenerek Denklem (2.61) ve (2.62) oluşturulur.

$$\varphi_r^s(t) = (f_r t + f_r \varsigma_r) - (f^s t - f^s \frac{\rho}{c} + f^s \varsigma^s \quad) + N \tag{2.61}$$

$$\varphi_r^s(t) = \ f_r (t + \varsigma_r) - f^s \left(t - \frac{\rho}{c} + \varsigma^s \right) + N \tag{2.62}$$

f^s, f_r frekansları elektromanyetik dalga spektrumunun L bandında (1GHz - 2GHz) yayınlanan frekanslardır. İki frekans arasında yaklaşık 1.5x10^{-3} Hz fark vardır. Bu fark ise göz ardı edilebilecek bir farktır. Çünkü çakıştırılmış sinyalde (beat signal) oluşabilecek maksimum hata 10^{-4} döngü (Cycle) altında kaldığı için göz ardı edilebilir (Hofmann-Wellenhof vd., 2007). Bu durum dikkate alındığında $f^s = f_r = f$ eşitliği kurulabilir.

$$\varphi_r^s(t) = f (t + \varsigma_r) - f \left(t - \frac{\rho}{c} + \varsigma^s \right) + N \tag{2.63}$$

$$\varphi_r^s(t) = f \frac{\rho}{c} + f (\varsigma_r - \varsigma^s) + N \tag{2.64}$$

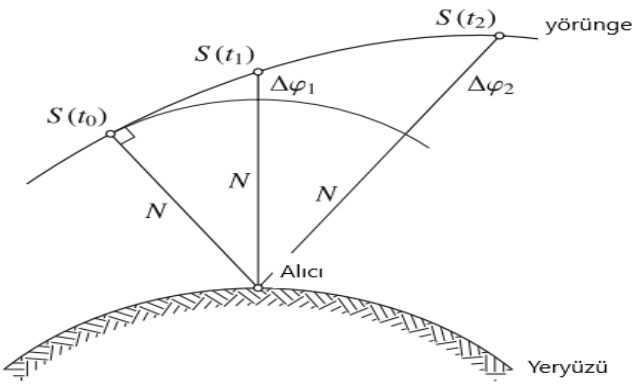
Denklem (2.63) ve (2.64) bağıntısı alıcı ve uydudan üretilen fazların farkı alınarak oluşturulmuş beat sinyali ifade eder. Beat sinyal Denklem (2.54)'da olduğu gibi $B(t)$ şeklinde ifade edilerek Denklem (2.65)'de ortaya konulmuştur.

$$B(t) = f\frac{\rho}{c} + f\ (\varsigma_r - \varsigma^s) + N \tag{2.65}$$

Denklem (2.65) bağıntısında eşitliğin sağ tarafındaki N beat sinyalin tam dalga sayısını ifade ederken, onun dışında kalanlar dalganın kesirli kısmını ifade eder. t_0 anında kesirli kısım sıfır kabul edilirken t_1 veya t_2 anında kesirli kısım sürekli değişir. Tamsayı belirsizliğinin geometrik yorumu

Şekil 2.9 Faz ölçüsünün geometrik yorumu (Hofmann-Wellenhof vd., 2007)

'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Faz ölçüsünün geometrik yorumu (Hofmann-Wellenhof vd., 2007)

Denklem (2.65)'de beat sinyal bağıntısından yola çıkarak uydu alıcı arası mesafeyi yorumlamak için ilk olarak f yerine $\frac{c}{\lambda}$ ifadesi ve $\varsigma_r - \varsigma^s$ yerine $\triangle\ \varsigma$ ifadesi yazılırsa Denklem (2.66) oluşturulur.

$$B(t) = -\frac{1}{\lambda}\rho - \frac{c}{\lambda}\triangle\ \varsigma\ + N \tag{2.66}$$

Fazın negatif hali alınarak faz mesafesinin geometrik yorumu elde edilir. $\Phi = -B(t)$ eşitliği kullanılarak Denklem (2.67) üretilir.

$$\Phi = \frac{1}{\lambda}\rho + \frac{c}{\lambda}\triangle\ \varsigma\ + N \tag{2.67}$$

Denklem (2.67) bağıntısında her bir eleman λ ile çarpılarak Denklem (2.68) elde edilir.

$$\lambda\Phi = \rho + c \triangle \varsigma \ + \lambda N \tag{2.68}$$

A noktasında ölçüm yapan alıcının j uydusundan kaydettiği faz değerine $\Phi_A^j(T_A)$ denilirse, Denklem (2.69) ifadesi üretilir.

$$\lambda\Phi_A^j(T_A) = \rho + c \triangle \varsigma \ + \lambda N_A^j \tag{2.69}$$

Blewitt (1997) çalışmasına göre alıcı tarafından kaydedilen faz ölçüsü $\Phi_A^j(T_A)$ sinyalin bir dalga boyu λ ile çarpılarak uydu alıcı arasındaki mesafe $\lambda\Phi_A^j(T_A)$ kestirimi metre biriminde yapılır. Yeryüzünde A noktasında j uydusuna faz ölçüleri gözlemleri yapılarak A noktası ile j uydusu arasındaki mesafe $L_A^j(T_A)$ olarak ifade edilir ve Denklem (2.70) üretilir.

$$L_A^j(T_A) = \lambda\Phi_A^j(T_A) \tag{2.70}$$

Denklem (2.66) bağıntısı Denklem (2.70)'de yerine yazılarak Denklem (2.71), (2.72) ve (2.73) elde edilir.

$$L_A^j(T_A) = \lambda\left(\frac{1}{\lambda}\rho_A^j(t_A, t^j) + \frac{c}{\lambda} \triangle \varsigma \ + N_A^j\right) \tag{2.71}$$

$$L_A^j(T_A) = \rho_A^j(t_A, t^j) + c \triangle \varsigma \ + \lambda N_A^j \tag{2.72}$$

$$L_A^j(T_A) = \rho_A^j(t_A, t^j) + c(\varsigma_r - \varsigma^s) + \lambda N_A^j \tag{2.73}$$

Burada ς_r ve ς^s saat hatalarından kaynaklanmaktadır. $\rho_A^j(t_A, t^j)$ ifadesi A noktasındaki alıcının j uydusuna olan yaklaşık mesafesini temsil eder. Ancak rölativistik etki kaynaklı saat terimini etkileyen Δt_{ref} hatası unutulmamalı ve $c(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref})$ olarak eklenmelidir. Δt_{ref}'in nasıl hesaplandığına dair ayrıntılı bilgi uydu saat hata değerlerinin hesabı (2.1.1) başlığı altında anlatılmıştır. Sonuç olarak denklem aşağıdaki şekilde ifade edilir (Hofmann-Wellenhof vd., 2007).

$$L_A^j(T_A) = \rho_A^j(t_A, t^j) + c(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}) + \lambda_0 N_A^j \tag{2.74}$$

(2.74) denkleminde $\rho_A^j(t_A, t^j)$ pseudo-range ifadesini, ς_r alıcı saat hatasını, ς^s uydu saat hatasını, Δt_{ref} rölativite etkisini ve N_A^j tamsayı ifadesini temsil eder. Böylece uydu alıcı mesafe denklemi oluşturulur. Fakat atmosferik etkiler hesaplanıp eklenmeden hassas mesafe elde etmek mümkün değildir. Bunun için troposfer Z_A^j ve iyonosfer $-I_A^j$ hatalarının da eklenmesi gerekir. İyonosfer, taşıyıcı faz ölçülerine hızlandırıcı etkisinden dolayı iyonosferik hata $-I_A^j$ eksi işaretli yansıyacaktır (Subirana vd., 2013).

İyonosfer coğrafi konum, zaman ve güneş ışınlarına göre uydu faz sinyallerini ilerleterek bozulmasına neden olur. Bu bozulmaya bağlı iyonosferik etki GIM olarak bilinen iyonosferik model oluşturularak giderilir. İyonosferik model sinyal yolu boyunca sinyale etki eden toplam elektron yoğunluğu (TEC: Total Electron Content) ile orantılıdır. IGS ve CODE gibi kuruluşlar tarafından oluşturulmuş çalışma grubu IONEX (The Ionosphere Map Exchange Format Version) formatında TEC haritaları başka bir ifade ile GIM farklı yaklaşımlar kullanılarak "rapid" ve "final" olmak üzere iki farklı şekilde yayınlanır (Junjie, 2003). IONEX formatı içerisindeki TEC değerleri küresel koordinatlarda ECEF (Earth-Centered-Earth Fixed) referans çerçevesinde yayınlanır. TEC değeri hesaplanırken STEC (Slant Total Electron Content) değeri dikkate alınır.

$$I = \frac{40.3}{f^2}\, STEC \tag{2.75}$$

$$STEC = \int_{rec}^{sat} N_e\, ds \tag{2.76}$$

(2.75) bağıntısında bulunan f parametresi L_1 ve L_2 sinyallerine göre farklılaşan frekanstır. GIM modeli 2-8 TECU (Total Electron Content Unit) doğruluğuna sahiptir ki bu doğruluk GPS L_1 sinyali için 0.32-1.28 m konum hatasına sebep olur (Cai vd., 2017). GIM modeli kullanımı ölçü sonrası konum belirlemede uygun iken gerçek zamanlı konum belirlemede uygun değildir (Junjie, 2003). Gerçek zamanlı uygulamalar için Kalman filtreleme kullanılarak geliştirilmiş modeller söz konusudur.

Tek frekanslı alıcılarda iyonosferik gecikmenin %50 den daha fazlasını yok eden Klobuchar model gibi iyonosferik modeller uygulanır. Ancak santimetre

mertebesinde konum hassasiyetini yakalamak için hazır modeller yeterli değildir. Bununla birlikte gerçek zamanlı konum belirleme uygulamalarında hazır modeller doğrudan kullanılamaz. Bu yüzden çift frekanslı alıcılarda iyonosfer etkisi giderilmesi için IF kombinasyonu kullanılır (Kouba & Héroux, 2001; Nykiel & Figurski, 2016). IF faz kombinasyonları IF Faz Kombinasyonu başlığı altında detaylı bahsedilecektir. Uydu ve alıcı arası mesafeye ait matematiksel modelde çift frekanslı bir alıcı kullanılarak iyonosferik etki ve troposferik etki Denklem (2.77) bağıntısında gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} L_A^j(T_A) &= \lambda\Phi_A^j(T_A) \\ &= \rho_A^j\left(t_A, t^j\right) + c\left(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}\right) + Z_A^j - I_A^j + \lambda N_A^j \\ &\quad + TGD + \varepsilon \end{aligned} \tag{2.77}$$

3
TAŞIYICI FAZ BELİRSİZLİK ÇÖZÜMÜ

GNSS ile konum belirlemede uydu alıcı arasındaki mesafe kod ve faz olmak üzere iki farklı sinyal ile bulunur. Kod gözlemleri her uydudan P kod ve C/A kod olarak yayınlanarak navigasyon mesajı üretilmesini sağlayan dijital/kesikli sinyallerdir. Faz sinyalleri kod sinyallerinden farklı olarak üzerinde bilgi taşıyan analog/sürekli sinyaller olup doğruluğu kod ölçülerine göre daha fazla ancak daha çok hataya maruz kalabilen sinyallerdir. Uydu alıcı arasındaki mesafe modelini doğrudan etkileyen tamsayı belirsizliğinin belirlenmesi analog/sürekli sinyallerin maruz kaldığı bir hatadır. Bu hatanın giderilmesi Taşıyıcı Faz Belirsizlik Çözümü olarak bilinmektedir.

GNSS uydularından gelen taşıyıcı faz sinyalleri alıcı da üretilen "replica" sinyal ile çakıştırıldıktan sonra "Beat" sinyal olarak isimlendirilen sinyal oluşur. Alıcı ilk açıldığı anda "Beat" sinyalin kesirli (fractional) kısmından okumaya başlar ve sinüzoidal dalganın başlangıcına gelince tam dalgalar sayılmaya başlanır. Alıcı ilk verileri okumaya başladığı anda uydu ile alıcı arasında kaç tam dalga, kaç kesirli dalga olduğunu bilenemez (Laurichesse & Banville, 2018). Taşıyıcı faz ölçüleri dalganın bilinmeyen tamsayısına bağlı olarak uydu alıcı arasında mesafeyi bulmaya çalışır. Taşıyıcı faz ölçülerinin hassas konum belirleme özelliğinden yararlanabilmek için tamsayı değerinin bulunması gerekir (Yoon & Lundberg, 2002). Dalga sayısının tam olarak bilinmesi ile uydu alıcı arası mesafe kestirilir. Fakat kaç tam dalga ve kaç kesirli dalga olduğunun kestirilmesi tamsayı belirsizliği (integer ambiguity) olarak literatüre geçmiştir. Araştırmacılar tarafından taşıyıcı faz tamsayı belirsizliği çözümü iki ölçüt üzerinden incelenmiştir. Birincisi yüksek doğruluklu GNSS dalga sayısı kestirimi ve ikincisi yakınsama süresidir.

Uydu alıcı arası dalga sayısı belirlenmeden uydu alıcı arasındaki mesafeyi hassas bir şekilde modellemek mümkün değildir. Uydu alıcı arasındaki mesafe modelini oluştururken uydu alıcı arasındaki dalga sayısı farklı algoritmalar ile hesaplanarak modele dahil edilebilir. Farklı konum belirleme tekniklerine göre uydu alıcı arasındaki dalga sayısı kestiriminin belirlenmesi farklılık göstermektedir.

Rölatif konum belirleme tekniğinde fark alma yöntemleri kullanılarak LAMBDA, LMS, LSAST, FARA, FASF, OMEGA gibi teknikler uygulanmıştır. Bu teknikler arasından en çok kullanılan LAMBDA tekniğidir.

Fark alma yönteminin kullanılmadığı PPP tekniğinde matematiksel model hem kod hem de faz için oluşturulur ve tamsayı belirsizliği çözümü kod ve faz kombinasyonları kullanılarak giderilmeye çalışılır (Laurichesse & Blot, 2016). Bununla birlikte kullanılan çeşitli kod ve faz ölçülerine göre farklı kombinasyonlar üretilmiştir. Örneğin IF kod ve faz kombinasyonları oluşturularak geleneksel PPP tekniği oluşturulmuştur. Geleneksel PPP'de tamsayı belirsizliğinin çözümü için yaklaşık 20 dakikalık yakınsama süresine ihtiyaç duyulur (Öcalan ve Soycan, 2012). Yakınsama süresinden sonra cm-mm hassasiyette konum belirlenebilse de uzun yakınsama süresi bu tekniğin dezavantajı kabul edilir. Tamsayı belirsizlik çözümünde yakınsama süresinin azaltılması ve belirsizliğin giderilmesi için farklı kombinasyonlar uygulanmıştır.

3.1 PPP Tekniğinde Faz Belirsizliği Çözümü

Birçok araştırmacının çalışması sonucu PPP matematiksel modeli ortaya koyulmuş ve gelişimi devam etmektedir. İlk PPP fonksiyonel modelleri IF kombinasyonunu uygulayan bir yapıdadır. Geleneksel PPP mimarisi olarak literatürde yer bulan ilk PPP yapısının, tamsayı belirsizliği kestirim hassasiyetini ve sürecini olumsuz etkilediği görülmüştür. Ancak yine de ham kod ve faz ölçülerine kombinasyonlar uygulanarak iyonosferik gecikme, geometrik gecikme, faz sıçraması, multipath gibi hatalar birçok araştırmacı tarafından çalışılmaktadır. Bu bağlamda farklı kombinasyonlar ve fonksiyonel modeller ile tamsayı belirsizliği yönünden geliştirilen geleneksel PPP yapısı, PPP-AR olarak literatürde yer almaktadır.

PPP-AR çözümlerinde ilk olarak faz ve kod ölçüleri için kombinasyonlar dikkate alınmalıdır. Faz ve kod ölçülerinin çeşitliliği arttıkça birden fazla kombinasyon türünden bahsetmek mümkündür. Bununla birlikte en çok bilinen kombinasyonlar IF ve MW kombinasyonlarıdır.

3.1.1 Faz ve Kod Ölçüleri için IF Kombinasyonu

Faz ve kod ölçüleri kullanılarak üretilen IF kombinasyonu en temel kombinasyon türü olup geleneksel PPP ile özdeşleşen hem kod hem de faz ölçüleri için uygulanabilen bir kombinasyon şeklidir.

3.1.1.1 IF Faz Kombinasyonu

Denklem (2.77) bağıntısından yola çıkarak bir uydunun iki farklı frekansta (L_1 ve L_2 faz) eşitlikleri dalga boylarına bölerek Denklem (3.1) ve (3.2) oluşturulur.

$$\Phi_A^j(T_A)_{L1} = \rho_A^j(t_A, t^j)\frac{1}{\lambda_1} + \frac{c}{\lambda_1}(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}) + N_{A\,L1}^j - \frac{1}{\lambda_1} I_1^{Iono} \qquad (3.1)$$

$$\Phi_A^j(T_A)_{L2} = \rho_A^j(t_A, t^j)\frac{1}{\lambda_2} + \frac{c}{\lambda_2}(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}) + N_{A\,L2}^j - \frac{1}{\lambda_2} I_2^{Iono} \qquad (3.2)$$

Denklem (3.1) ve (3.2)'de ışık hızı c yerine $c = f\,\lambda$ ve $\triangle\,\varsigma$ yerine $\triangle\,\varsigma = (\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref})$ kullanılır Denklem (3.3) ve (3.4) oluşturulur.

$$\Phi_A^j(T_A)_{L1} = \rho_A^j(t_A, t^j)\frac{1}{\lambda_1} + f_1\,\triangle\,\varsigma + N_{A\,L1}^j - \frac{1}{\lambda_1} I_1^{Iono} \qquad (3.3)$$

$$\Phi_A^j(T_A)_{L2} = \rho_A^j(t_A, t^j)\frac{1}{\lambda_2} + f_2\,\triangle\,\varsigma + N_{A\,L2}^j - \frac{1}{\lambda_2} I_2^{Iono} \qquad (3.4)$$

Bu denklemlerde bazı terimler f_1 ve f_2 parantezine alınırsa Denklem (3.5) ve (3.6) oluşturulur.

$$\Phi_A^j(T_A)_{L1} = f_1\left(\frac{\rho_A^j(t_A, t^j)}{c} + \triangle\,\varsigma\right) + N_{A\,L1}^j - \frac{f_1}{c} I_1^{Iono} \qquad (3.5)$$

$$\Phi_A^j(T_A)_{L2} = f_2\left(\frac{\rho_A^j(t_A, t^j)}{c} + \triangle\,\varsigma\right) + N_{A\,L2}^j - \frac{f_2}{c} I_2^{Iono} \qquad (3.6)$$

Denklem (3.5) ve (3.6) bağıntılarının daha sade gösterilmesi için $a = \frac{\rho}{c} + \triangle\,\varsigma$ ve $b = \frac{{f_i}^2}{c} I_i^{Iono}$ ifadeleri yerine yazılırsa Denklem (3.7) ve (3.8) oluşturulur.

$$\Phi_A^j(T_A)_{L1} = af_1 + N_{A\,L1}^j - \frac{b}{f_1} \qquad (3.7)$$

$$\Phi_A^j(T_A)_{L2} = af_2 + N_{A\,L2}^j - \frac{b}{f_2} \tag{3.8}$$

$b = \frac{f^2}{c} \triangle_i^{Iono}$ olarak ifade edilen iyonosfer terimi $\frac{f^2}{c} \triangle_i^{Iono} = \frac{1}{c} \frac{40.3}{\cos(z)} VTEC$ (Vertical Total Electron Content) ifadesine eşittir. Bu ifade Denklem (3.9)'de yerine yazılır.

$$\Phi_A^j(T_A)_{L1} = af_1 + N_{A\,L1}^j - (\frac{1}{c} \frac{40.3}{\cos(z)} VTEC\ ) \tag{3.9}$$

$$\Phi_A^j(T_A)_{L2} = af_2 + N_{A\,L2}^j - (\frac{1}{c} \frac{40.3}{\cos(z)} VTEC\ ) \tag{3.10}$$

$$f_1 \Phi_A^j(T_A)_{L1} = af_1^2 + f_1 N_{A\,L1}^j - b \tag{3.11}$$

$$f_2 \Phi_A^j(T_A)_{L2} = af_2^2 + f_2 N_{A\,L2}^j - b \tag{3.12}$$

Buraya kadar olan bağıntılar L_1 ve L_2 sinyalleri için faz ölçülerini göstermektedir. Denklem (3.9) ve (3.10)'da iyonosferik etkiyi gidermek için lineer faz kombinasyonu kullanılır. Bunun için Denklem (3.9) ve (3.10) bağıntıları sırasıyla f_1 ve f_2 ile çarpılarak Denklem (3.11) ve (3.12) oluşturulur. Bu iki denklemin lineer farkları alınırsa Denklem (3.13) oluşturulur.

$$f_1 \Phi_A^j(T_A)_{L1} - f_2 \Phi_A^j(T_A)_{L2} = a\ (f_1^2 - f_2^2) + f_1 N_{A\,L1}^j - f_2 N_{A\,L2}^j \tag{3.13}$$

a ifadesini açık halde yazdıktan sonra $f_1/(f_1^2 - f_2^2)$ ifadesi ile çarpılırsa Denklem (3.14) oluşturulur.

$$\left[\Phi_A^j(T_A)_{L1} - \frac{f_2}{f_1} \Phi_A^j(T_A)_{L2}\right] \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} = f_1 \frac{\rho_A^j(t_A, t^j)}{c} + f_1 \triangle \varsigma + \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} [N_{A\,L1}^j - \frac{f_2}{f_1} N_{A\,L2}^j] \tag{3.14}$$

Bu faz kombinasyonun dezavantajı f_2/f_1 ifadesinin tamsayı olmamasından dolayı belirsizliğin tamsayı özelliğinin kaybolmasıdır (Blewitt, 1997). f_2/f_1 ifadesine bağlı olarak eşitliğin sol tarafında belirsizlik az da olsa korunacaktır.

İyonosferik bağımsız faz denklemi kullanılarak uydu ve alıcı arasındaki geometrik mesafe $L_A^j(T_A)'yi$ ifade edebilmek için faz kombinasyonundaki tüm ifadeler $^c/_{f_1}$ ile çarpılarak Denklem (3.15 oluşturulur.

$$\left[\Phi_A^j(T_A)_{L1} - \frac{f_2}{f_1}\Phi_A^j(T_A)_{L2}\right]\frac{cf_1}{f_1^2 - f_2^2} = \rho_A^j(t_A, t^j) + + c \triangle \varsigma + \frac{cf_1}{f_1^2 - f_2^2}\left[N_{A\,L1}^j - \frac{f_2}{f_1}N_{A\,L2}^j\right] \quad (3.15)$$

c yerine $c = f_1\lambda_1$ifadesi ve troposferik etki de eklenerek Denklem (3.16) oluşturulur.

$$\left[\Phi_A^j(T_A)_{L1} - \frac{f_2}{f_1}\Phi_A^j(T_A)_{L2}\right]\frac{\lambda_1 {f_1}^2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho_A^j(t_A, t^j) + + c \triangle \varsigma + Z_A^j + \frac{\lambda_1 {f_1}^2}{f_1^2 - f_2^2}\left[N_{A\,L1}^j - \frac{f_2}{f_1}N_{A\,L2}^j\right] \quad (3.16)$$

$c = f_2\lambda_2$ ifadesi kullanılarak tekrar düzenlenirse Denklem (3.17) oluşturulur.

$$\left[\frac{\lambda_1\Phi_A^j(T_A)_{L1}{f_1}^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2\Phi_A^j(T_A)_{L2}{f_2}^2}{f_1^2 - f_2^2}\right] = \rho_A^j(t_A, t^j) + + c \triangle \varsigma + Z_A^j + \frac{\lambda_1 N_{L1}{f_1}^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 N_{L2}{f_2}^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (3.17)$$

Bu denklemlerde $\rho_A^j(t_A, t^j)$ "pseudo-range" mesafesi, ışık hızı c saat hatası $\triangle \tau$, troposferik gecikme Z_A^j, $N_{A\,L1}^j$ve $N_{A\,L2}^j$ j uydusundan alınan L_1 ve L_2 sinyallerinin tamsayı belirsizliği olarak ifade edilir.

$L_A^j(T_A) = \lambda\Phi_A^j(T_A)$ ifadesi Denklem (3.17)'de yerine yazılarak Denklem (3.18) oluşturulur.

$$\left[\frac{L_A^j(T_A)_{L1}{f_1}^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{L_A^j(T_A)_{L2}{f_2}^2}{f_1^2 - f_2^2}\right] = \rho_A^j(t_A, t^j) + + c \triangle \varsigma + Z_A^j + \frac{\lambda_1 N_{L1}{f_1}^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 N_{L2}{f_2}^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (3.18)$$

Özetle iyonosfer bağımsızlığı yakalamak için çift frekans üzerinden Denklem (3.19) oluşturulur.

$$L_{IF} = \frac{f_1^2 L_{A,L1}^j - f_2^2 L_{A,L2}^j}{f_1^2 - f_2^2} = \rho_A^j(t_A, t^j) + c \triangle \varsigma + Z_A^j + \frac{\lambda_1 N_{L1} {f_1}^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 N_{L2} {f_2}^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (3.19)$$

İyonosfer bağımsız çözüm ile iyonosferik etki %99.9 oranında kaldırılır. Ancak tamsayı belirsizliğini N_A^j tam değer olarak kestirmek için bir süreye ihtiyaç duyulur. Tamsayı belirsizliğini daha hızlı ve hassas bir şekilde çözmek PPP-AR tekniğinin konusudur. PPP-AR tekniğinde L_1 ve L_2 sinyallerine ait tamsayı değerleri ($\frac{\lambda_1 N_{L1} {f_1}^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 N_{L2} {f_2}^2}{f_1^2 - f_2^2}$) eş zamanlı olarak çözülemez. Bu yüzden genel olarak Wide-Lane belirsizlik çözümü, Narrow-Lane belirsizlik çözümü ve MW kombinasyonu şeklinde gerçekleştirilir (Yi vd., 2016). Denklem (3.19) bağıntısında IF kombinasyonu uygulanınca L_1 ve L_2 frekanslarının N_{L1} ve N_{L2} tamsayı belirsizliği Denklem (3.20) bağıntısında N_{IF} olarak gösterilmiştir. Ayrıca N_{L1}ve N_{L2} belirsizliğinin içerisinde iki frekansa ve alıcıya ait faz kayıklıkları da ($\mathrm{b}_{L1}^s, \mathrm{b}_{L2}^s \; ve \; \mathrm{b}_{L1}^r, \mathrm{b}_{L2}^r$) bulunur. Söz konusu faz kayıklıkları b_{IF}^r ve b_{IF}^s olarak ifade edilmiştir.

$$N_{IF} = N_3 + b_{IF}^r - b_{IF}^s$$

$$L_A^j(T_A)_{IF} = \rho_A^j(t_A, t^j) + c \triangle \varsigma \; + Z_A^j - \lambda_3 N_3 + b_{IF}^r - b_{IF}^s \quad (3.20)$$

Uydu ve alıcılar için faz kayıklıkları Tamsayı Belirsizliği Çözümü için Matematiksel Modeller başlığı altında detaylı anlatılmıştır.

3.1.1.2 IF Kod Kombinasyonu

İyonosferik etki toplam elektron yoğunluğu hesaplanarak tespit edilir. IF Faz Kombinasyonu başlığı altında faz ölçülerine faz kombinasyonları uygulanarak iyonosferden bağımsızlık sağlanmıştır. Kod "pseudo-range" ölçüleri için kombinasyon uygulanması aşamasında iki farklı kod ölçüsü için Denklem (3.21) ve (3.22) oluşturulur.

$$R_1 = \rho^s(t,t^s)_{L1} + \ c\ (\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}) + I_1^{Iono} \tag{3.21}$$

$$R_2 = \rho^s(t,t^s)_{L2} + c\ (\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref})\ + I_2^{Iono} \tag{3.22}$$

Denklem (3.23)'de iyonosfer ifadesi Denklem (3.21) ve (3.22)'de yerine yazılarak Denklem (3.24) ve (3.25)'de ortaya konulmuştur.

$$I_i^{Iono} = \frac{1}{f^2}\frac{40.3}{\cos(z)}VTEC \tag{3.23}$$

$$R_1 = \rho^s(t,t^s)_{L1} + c\ (\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}) + \frac{1}{f_1^2}\frac{40.3}{\cos(z)}VTEC \tag{3.24}$$

$$R_2 = \rho^s(t,t^s)_{L2} + c\ (\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}) + \frac{1}{f_2^2}\frac{40.3}{\cos(z)}VTEC \tag{3.25}$$

Denklem (3.24) ve (3.25)'deki ifadeler sırasıyla f_1^2, f_2^2 ile çarpılarak ve $R_1 - R_2$ farkı alınırsa Denklem (3.26) oluşturulur. Denklem (3.26)'da $(f_1^2 - f_2^2)$ ifadesi eşitliğin sol tarafına atılarak $\frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)}$ parantezine alınırsa (3.27) oluşturulur.

$$f_1^2 R_1 - f_2^2 R_2 = (f_1^2 - f_2^2)(\rho^s(t,t^s) + \triangle\, \varsigma\ c) \tag{3.26}$$

$$\left[R_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2}R_2\right]\frac{f_1^2}{(f_1^2 - f_2^2)} = \rho^s(t,t^s) + c\ \triangle\, \varsigma \tag{3.27}$$

Denklem (3.27) bağıntısında verilen kod ölçüsü fonksiyonel modeli kullanılarak IF kod ölçüsü (3.28) bağıntısında ifade edilmiştir.

$$R_{IF} = \rho^s(t,t^s) + c\ \triangle\, \varsigma + Z_r^s + b_{IF}^r - b_{IF}^s \tag{3.28}$$

İyonosfer bağımsız kombinasyonu sebebiyle TGD hatası giderilmiştir. Bunun dışında uydu ve alıcı için kayıklık etkileri (b_{IF}^r, b_{IF}^s) fonksiyonel modele dahil edilmiştir. Böylece kod kombinasyonu kullanarak iyonosferik etki giderilmiştir. Uydu ve alıcılar için kayıklıklar "Tamsayı Belirsizliği Çözümü için Matematiksel Modeller" başlığı altında detaylı anlatılmıştır.

3.1.1.3 IF Kombinasyonu ve En Küçük Kareler Çözümü

Uydu alıcı arası mesafe kod-faz ölçüleri kullanılarak ve bu ölçülere belirli düzeltmeler getirilerek bulunmuştur. Hem kod hem de faz ölçüleri sayesinde bir gözlem anında görünen uydu sayısının iki katı kadar çözüm denklemi üretilir. Ayrıca bu çözüm denklemleri tek epokta değil birden fazla epokta olacağı düşünülürse, epok sayısıyla orantılı kümülatif artan çözüm denklemleri oluşturulur. Bu denklemler en küçük kareler yöntemine göre çözülür. Bu denklemler matris çözümünden önce lineerleştirmek için Taylor serisine açılması gerekir (Subirana vd., 2013).

$x(t), y(t), z(t)\ ve\ \varsigma$ bilinmeyenler üzerinden $\rho^s(t)_{(x,y,z,\varsigma)}$'in hesabı için en küçük kareler yönteminden yararlanılır (Blewitt, 1997).

$$\rho^s(t)_{(x,y,z,\varsigma)} = \rho^s(t)_{\text{ölçülen}} - \rho^s(t)_{hesaplanan} + \varepsilon \tag{3.29}$$

Denklem (3.29)'da $\rho^s(t)_{\text{ölçülen}}$ gözlem dosyasından alınan uydu alıcı arasındaki mesafe, $\rho^s(t)_{hesaplanan}$ hata parametreleri hesaplanarak modellenmiş uydu alıcı arasındaki mesafe ve gürültü olarak ifade edilmektedir.

Denklem (3.29) bağıntısı x_0, y_0, z_0 yaklaşık alıcı koordinatları kullanılarak $x(t), y(t), z(t)\ ve\ \varsigma_{rec}$ bilinmeyenleri üzerinden Taylor serisine açılarak Denklem (3.30) oluşturulur.

$$\begin{aligned}\rho^s(t)_{\text{ölçülen}} - \rho^s(t)_{hesaplanan} &= \rho^s(t)_{(x_0,y_0,z_0)} + \frac{(x-x_0)}{\rho^s(t)_{(x_0,y_0,z_0)}}dx \\ &+ \frac{(y-y_0)}{\rho^s(t)_{(x_0,y_0,z_0)}}dy + \frac{(z-z_0)}{\rho^s(t)_{(x_0,y_0,z_0)}}dz + cd\varsigma_{rec}\end{aligned} \tag{3.30}$$

Taylor serisine açılmış bir fonksiyonun tüm bilinmeyenlerin ($x(t), y(t), z(t)$ ve ς_{rec}) sırasıyla türevleri alınarak küçültülmüş bilinmeyenler (dx, dy, dz ve $d\varsigma_{rec}$) elde edilir. Burada bilinmeyen olarak troposferik gecikmeden de bahsetmek gerekir. Ancak tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların ikisinde troposferik gecikme hazır modeller kullanılarak giderilmiştir. Gözlemlerin simüle edildiği çalışmada troposferik gecikme gözlemlere yansıtılmamıştır. Denklem (3.31)'de

$t(i)$ ifadesi epoğu ifade etmek üzere birden fazla epoktaki ölçüler için matris çözümü gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix}\rho^s(t(1))\\ \rho^s(t(2))\\ \rho^s(t(3))\\ .\\ .\\ .\\ \rho^s(t(n))\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{(x-x_0)}{\rho^s(t(1))_0} & \frac{(y-y_0)}{\rho^s(t(1))_0} & \frac{(z-z_0)}{\rho^s(t(1))_0} & 1\\ \frac{(x-x_0)}{\rho^s(t(2))_0} & \frac{(y-y_0)}{\rho^s(t(2))_0} & \frac{(z-z_0)}{\rho^s(t(2))_0} & 1\\ \frac{(x-x_0)}{\rho^s(t(3))_0} & \frac{(y-y_0)}{\rho^s(t(3))_0} & \frac{(z-z_0)}{\rho^s(t(3))_0} & 1\\ . & . & . & .\\ . & . & . & .\\ . & . & . & .\\ \frac{(x-x_0)}{\rho^s(t(n))_0} & \frac{(y-y_0)}{\rho^s(t(n))_0} & \frac{(z-z_0)}{\rho^s(t(n))_0} & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}dx\\ dy\\ dz\\ d\varsigma_{rec}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}v(t(0))\\ v(t(1))\\ v(t(2))\\ .\\ .\\ .\\ v(t(n))\end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Denklem (3.31)'de bir uydunun birden fazla n epoklu düzeltme denklemi ifade edilmiştir. Bir uydunun A katsayılar matrisindeki $\frac{(x-x_0)}{\rho^s(t(1))_0}$, $\frac{(y-y_0)}{\rho^s(t(1))_0}$ ve $\frac{(z-z_0)}{\rho^s(t(1))_0}$ ifade yerine $G^1\triangle_{xyz}$ ve $\rho^s(t)$ yerine $l^1(t)=\rho^1(t)_{\text{ölçülen}}-\rho^1(t)_{hesaplanan}$ ifadesi yazılarak $V=Ax-l$ formuna dönüştürülürse Denklem (3.32) oluşturulur.

$$\begin{bmatrix}v^1(t(0))\\ v^1(t(1))\\ v^1(t(2))\\ .\\ .\\ .\\ v^1(t(n))\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}G^1\triangle_{xyz}(t(0)) & 1\\ G^1\triangle_{xyz}(t(1)) & 1\\ G^1\triangle_{xyz}(t(2)) & 1\\ . & .\\ . & .\\ . & .\\ G^1\triangle_{xyz}(t(n)) & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}dx\\ dy\\ dz\\ d\varsigma_{rec}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}l^1(t(1))\\ l^1(t(2))\\ l^1(t(3))\\ .\\ .\\ .\\ l^1(t(n))\end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Denklem (3.32) eşitliğinde n epoklu bir uydunun düzeltme denklemleri oluşturulmuştur. Bu denklem çözümünde kod ve faz ölçülerinin düzeltmeleri beraber gösterilmiştir. Kod ve faz ölçüleri birbirinden farklı ölçüler olduğu için farklı denklemler ile çözüme dahil edilmelidir. Ayrıca kod ve faz ölçülerine IF

kombinasyonu uygulandığı için bir epokta R_{IF} ve L_{IF} olarak iki çözüm denklemi oluşturulur. Bu eşitlik Denklem (3.33)'de ifade edilmiştir.

$$\begin{bmatrix} R_{IF}^1(t(0)) \\ R_{IF}^1(t(1)) \\ R_{IF}^1(t(2)) \\ \vdots \\ R_{IF}^1(t(n)) \\ L_{IF}^1(t(0)) \\ L_{IF}^1(t(1)) \\ L_{IF}^1(t(2)) \\ \vdots \\ L_{IF}^1(t(n)) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G^1 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 & 0 \\ G^1 \triangle_{xyz}(t(1)) & 1 & 0 \\ G^1 \triangle_{xyz}(t(2)) & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ G^1 \triangle_{xyz}(t(n)) & 1 & 0 \\ G^1 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 & \lambda_{IF} \\ G^1 \triangle_{xyz}(t(1)) & 1 & \lambda_{IF} \\ G^1 \triangle_{xyz}(t(2)) & 1 & \lambda_{IF} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ G^1 \triangle_{xyz}(t(n)) & 1 & \lambda_{IF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ d\varsigma_{rec} \\ N^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l^1(t(0)) \\ l^1(t(1)) \\ l^1(t(2)) \\ \vdots \\ l^1(t(n)) \\ l^1(t(0)) \\ l^1(t(1)) \\ l^1(t(2)) \\ \vdots \\ l^1(t(n)) \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Burada bilinmeyenler matrisine L_{IF} ölçüleri için tamsayı bilinmeyeni eklenmiştir. (3.33)'deki düzeltme denklemleri tek uydunun birden fazla epoğu için ayarlanmış matris formudur. Ancak bir ölçüm anında farklı uydu takımlarında yaklaşık 10-15 uydu görülebileceği düşünülürse; A katsayılar matrisi ve bilinmeyenler tekrar düzenlenir. Denklem (3.34)'de n adet uydunun tek epokta A katsayılar matrisi ve bilinmeyenler matrisi ifade edilmiştir. Farklı epoklardaki çözümler Denklem (3.34) matris formuna eklenerek A katsayılar matrisi genişletilecektir.

$$A = \begin{bmatrix} G^1 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G^2 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G^3 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G^n \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G^1 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 & \lambda_{IF} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G^2 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 & 0 & \lambda_{IF} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G^3 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 & 0 & 0 & \lambda_{IF} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ G^n \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{IF} \end{bmatrix}$$

Kod ölçülerine ait katsayılar

Faz ölçülerine ait katsayılar

$$x = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ d\varsigma_{rec} \\ N^1 \\ N^2 \\ N^3 \\ . \\ . \\ . \\ N^n \end{bmatrix}$$

Koordinat bilinmeyenleri

Alıcı saat hatası

Tamsayı belirsizliği bilinmeyenleri

(3.34)

Denklem (3.34) bağıntısında gösterilen $G^1 \triangle_{xyz}(t(0))$ ifadesi ilk epok için oluşturulan koordinat bilinmeyenlerinin katsayılarıdır. λ_{IF} ifadesi IF kombinasyonun dalga boyudur. dx, dy, dz koordinat bilinmeyeni, $d\varsigma_{rec}$ alıcı saat bilinmeyeni, $N^{1..n}$ ifadeleri ise farklı uydulara ait tamsayı belirsizliği bilinmeyenini ifade eder. Verilen katsayılar matrisine ve bilinmeyenlere göre EKK (En Küçük Kareler) çözümü epok epok gerçekleştirilmiştir. EKK çözümü her epok için bağımsız gerçekleştirilmesine rağmen epoklar arasında bağlantıyı sağlayacak filtrelemeye ihtiyaç duyulur. Bu filtreleme ile bir önceki epokta çözülmüş bilinmeyenlerin etkisi, bir sonraki epokta çözüme eklenmiştir. Bu filtreleme normal denklem çözümüne $(C_x)^{-1}$ifadesi eklenerek sağlanmıştır. Normal denklem çözümüne ait bağıntılar (3.35)'de verilmiştir.

$$x = N^{-1}n$$

$$N^{-1}(t) = (A^T P A + C_{x(t)})^{-1}$$

$$C_{x(t)} = (A^T P A + \left(C_{x(t-1)}\right)^{-1})^{-1} + C_n \qquad (3.35)$$

$$n = A^T P l$$

(3.35)'deki bağıntıda N^{-1} kofaktör matrisini temsil eder ve C_x ifadesi bilinmeyenlere ait varyans kovaryans matrisleridir. C_n ifadesi kinematik çözümlerde kullanılan varyans kovaryans matrisini ifade eder. Varyans kovaryans ifadesindeki t epoktur. Bu halde başlangıç epoku için bilinmeyenlere ait öncül varyans kovaryans değerlerinin verilmesi gerekecektir. $C_{x(t-1)}$ ifadesindeki bilinmeyenlere ait öncül varyans değerleri dx, dy ve dz için 100^2 m^2, $d\varsigma$ için $(10)^{10}$ m^2, tamsayı belirsizliği için 20^2 m^2 kullanılmıştır (Bahadur, 2017). $C_{x(t-1)}$

ifadesi iteratif bir şekilde her epok çözümü ardından hesaplanarak normal denklemlere eklenir. Bununla birlikte P ağırlıkları belirlenirken uydu yükseklik açıları önemlidir. Uydu yükseklik açısının hesabı için (3.36), (3.37) ve (3.38) bağıntıları kullanılır.

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p/a^2 \\ y_p/a^2 \\ z_p/b^2 \end{bmatrix} \tag{3.36}$$

(3.36) bağıntısında a ve b değerleri WGS84 (World Geodetic System 1984) elipsoidine ait eksenlerdir. x_p, y_p ve z_p ifadeleri alıcı noktasının yaklaşık koordinatlarıdır.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \\ z_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s - x_p \\ y_s - y_p \\ z_s - z_p \end{bmatrix} \tag{3.37}$$

' deki bağıntıda x_s, y_s ve z_s ifadeleri uydu koordinatlarıdır.

$$cos\aleph = \frac{x_d n_x + y_d n_y + z_d n_z}{\sqrt{x_d^2 + y_d^2 + z_d^2}\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \tag{3.38}$$

(3.38) bağıntısındaki $\aleph$ ifadesi zenit açısıdır. $E = 90 - \aleph$ ifadesi uydu yükseklik açısını verir.

(3.39) bağıntıda kod ve faz ölçüleri için P ağırlıkları gösterilmiştir. Burada s_0^2 öncül varyans olarak faz bilinmeyenleri arasındaki minimum varyans değeri alınmıştır. Öncül kod varyansı $\sigma_{p,0}^2$ için 3 metre, Öncül faz varyansı için $\sigma_{L,0}^2$ 3 milimetre alınmıştır.

$$k = \begin{Bmatrix} sin^2(E), & E < 30 \\ sin(E), & E > 30 \end{Bmatrix}$$

$$\sigma_p^2 = \frac{\sigma_{p,0}^2}{k} \quad ve \quad \sigma_L^2 = \frac{\sigma_{L,0}^2}{k} \tag{3.39}$$

$$P_p = \frac{s_0^2}{\sigma_p^2} \quad ve \quad P_L = \frac{s_0^2}{\sigma_L^2}$$

3.1.2 MW Kombinasyonu

MW kombinasyonu ilk olarak 2011 yılında Catalunia Üniversitesinde bulunan araştırmacılar tarafından faz sıçraması ve faz belirsizlik problemlerini çözmek için

oluşturulmuş bir kombinasyondur (Hofmann-Wellenhof vd., 2007). Bu kombinasyonda Wide-Lane faz ve Narrow-Lane kod kombinasyonlarının farkları kullanılmıştır. Bu sebeple öncelikle Wide-Lane ve Narrow-Lane kombinasyonlardan bahsedelim.

3.1.2.1 Wide-Lane Faz Kombinasyonu

Wide-Lane kombinasyonu çift frekanslı alıcılar ile GPS sinyallerinin L_1 ve L_2 sinyallerini kullanarak fazların farkı alınmasıyla oluşan dalga birimindeki kombinasyondur (Teunissen & Oliver, 2017). Tamsayı belirsizliği çözümünde, Multipath analizinde, iyonosferik etkinin giderilmesinde kullanılabilir.

$L_r^s(T_r)_{L1} = \lambda_{L1}\Phi_r^s(T_r)_{L1}$ ve $L_r^s(T_r)_{L2} = \lambda_{L2}\Phi_r^s(T_r)_{L2}$ ifadelerinden yararlanılarak metre biriminde Wide-Lane lineer eşitliği Denklem (3.40) ve (3.41)'de gösterilmiştir.

$$L_r^s(T_r)_{WL} = L_r^s(T_r)_{L1} - L_r^s(T_r)_{L2} \tag{3.40}$$

$$L_r^s(T_r)_{WL} = \frac{f_1}{f_1 - f_2} L_r^s(T_r)_{L1} - \frac{f_2}{f_1 - f_2} L_r^s(T_r)_{L2} \tag{3.41}$$

Wide-Lane gözlemlerinde $L_r^s(T_r)$ mesafesini etkileyecek iyonosferik hata gelen sinyallarin (L_1 ve L_2) dalga boylarının oranı miktarında düşürülür. Bu yönüyle Wide-Lane sinyal, tek sinyale göre iyonosferik etkiye daha az maruz kalır (Junjie, 2003). Ayrıca iyonosferik etkinin düşürülmesi tamsayı belirsizliği çözümünü kolaylaştıracaktır. Wide-Lane dalga boyu λ_{WL}(≈86.4 cm) Denklem (3.42)'de ifade edilmiştir.

$$\lambda_{WL} = \frac{\lambda_1\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} = \frac{c}{f_1 - f_2} \tag{3.42}$$

Uydu alıcı arası mesafenin lineer denklem formu üzerinden Wide-Lane tamsayı belirsizliği Denklem (3.43)'de verilmektedir.

$$N_{WL} = N_1 - N_2 \tag{3.43}$$

GPS L_1 ve L_2 sinyallerinin kullanıldığı durumda Wide-Lane olarak ifade edilen yaklaşık 86 cm dalga boyu uzunluğunda bir kombine dalgadan bahsedilir. Ancak GPS uydularının L_1 $(1575.42\,Mhz)$ ve L_2 $(1227.60\,MHz)$ dışında

L_5 $(1176.45\ MHz)$ sinyali de bulunmaktadır. L_5 frekansı ile L_1 frekansı dalga boyu 75 cm olan Medium-Lane (ML) kombinasyonunu oluşturmaktadır (Teunissen & Oliver, 2017). L_5 frekansı ile L_2 frekansı dalga boyu yaklaşık 586 cm olan Extra Wide-Lane (EWL) kombinasyonunu oluşturur. L_5 sinyalinin dahil olmasıyla farklı kombinasyonlar tamsayı belirsizliği çözümünü hızlandırmıştır. Örneğin GPS sinyallerinin EWL ve Wide-Lane kombinasyonları kullanılarak CIS (Cascade Integer Ambiguity) tekniği geliştirilmiştir (Laurichesse & Blot, 2016; Teunissen vd., 2002).

Wide-Lane ve Narrow-Lane kombinasyonlarını frekanslar üzerinden kombinasyonları Tablo 3.1'de özetlenmiştir.

Tablo 3.1 GPS uyduları için frekanslar ve kombinasyonlar (Laurichesse & Blot, 2016)'dan alınarak düzenlenmiştir

Sistem	Sinyal	Frekans (Mhz)	Dalga boyu (metre)	Sinyal kombinasyon Durumu	Wide-Lane (metre)	Narrow-Lane (metre)
	i	f_i	$\lambda = \frac{c}{f_i}$	ij	$\lambda = \frac{c}{f_i - f_j}$	$\lambda = \frac{c}{f_i + f_j}$
GPS	L_1	1575.20	0.19	L_1 -L_2	0.862 (Wide-Lane)	0.107
	L_2	1227.60	0.244	L_1 -L_5	0.751 (ML)	0.109
	L_5	1176.45	0.255	L_2 -L_5	5.861 (EWL)	0.125

Wide-Lane dalga boyunun standart sapması σ_{WL} Denklem (3.44)'de ifade edilir.

$$\sigma_{WL} = \sqrt{\frac{{f_1}^2}{(f_1 - f_2)^2}\sigma_1^2 + \frac{{f_2}^2}{(f_1 - f_2)^2}\sigma_2^2} \tag{3.44}$$

Burada f_1 ve f_2 frekanslarının standart sapmaları σ_1 ve σ_2 eşit kabul edilirse Denklem (3.45) üretilir.

$$\sigma_{WL} = \sqrt{\frac{{f_1}^2 + {f_2}^2}{(f_1 - f_2)^2}\sigma^2} \tag{3.45}$$

3.1.2.2 Narrow-Lane Kod Kombinasyonu

Narrow-Lane kombinasyonu çift frekanslı alıcılar ile GPS'in R_1 ve R_2 sinyallerini kullanarak fazların toplamı alınmasıyla oluşan dalga birimindeki kombinasyondur (Teunissen & Oliver, 2017). Genellikle Wide-Lane ile kullanılır.

$R_r^s(T_r)_{NL} = \lambda_{L1} R_r^s(T_r)_{R1}$ ve $R_r^s(T_r)_{R2} = \lambda_{R2} R_r^s(T_r)_{R2}$ ifadelerinden yararlanılarak metre biriminde Narrow-Lane lineer Denklem (3.46) ve (3.47)'de gösterilmiştir.

$$R_r^s(T_r)_{NL} = R_r^s(T_r)_{R1} + R_r^s(T_r)_{R2} \tag{3.46}$$

$$R_r^s(T_r)_{\lambda_{NL}} = \frac{f_1}{f_1 + f_2} R_r^s(T_r)_{R1} + \frac{f_2}{f_1 + f_2} R_r^s(T_r)_{R2} \tag{3.47}$$

Narrow-Lane dalga boyu λ_{NL} (≈10.7 cm) ve standart sapması σ_{NL} Denklem (3.48)'de ifade edilmektedir.

$$\lambda_{NL} = \frac{c}{f_1 + f_2} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \qquad \sigma_{NL} = \sqrt{\frac{{f_1}^2 + {f_2}^2}{(f_1 + f_2)^2}\sigma^2} \tag{3.48}$$

Denklem (3.48)'de f_1 ve f_2 frekanslarına ait standart sapmalar eşit kabul edilmiştir. Daha küçük dalga boyu tamsayı belirsizliği çözümünü zorlaştıracaktır (Junjie, 2003). Burada farklı kod ölçülerine ait varyanslar eşit kabul edilmiştir. Uydu alıcı arası mesafenin lineer denklem formu üzerinden Narrow-Lane tamsayı belirsizliği Denklem (3.49)'da ifade edilir.

$$N_{NL} = N_1 - N_2 \tag{3.49}$$

Narrow-Lane dalga boyu ile tamsayı belirsizliği çözümü zorlaşmasına rağmen uydu alıcı arasındaki mesafeye bağlı konum hatasının diğer dalga boylarına (Wide-Lane, IF, L_1 dalga boyu) göre daha iyi sonuç vermesi beklenir.

3.1.2.3 MW Kombinasyonu

Kod ve faz ölçüleriyle uydu alıcı arası mesafe formülleri arasında kombinasyonlar alınarak Wide-Lane ve Narrow-Lane dalga boylarına sahip yeni fonksiyonel model

oluşturulmuştur. MW kombinasyonu Wide-Lane faz ölçülerinin ve Narrow-Lane kod ölçülerinin farkları alınarak Denklem (3.50) oluşturulur.

$$\begin{aligned} LR_{MW} &= L_r^s(T_r)_{WL} - R_r^s(T_r)_{NL} \\ &= \frac{f_1}{f_1 - f_2} L_r^s(T_r)_{L1} - \frac{f_2}{f_1 - f_2} L_r^s(T_r)_{L2} \\ &- \frac{f_1}{f_1 + f_2} R_r^s(T_r)_{R1} - \frac{f_2}{f_1 + f_2} R_r^s(T_r)_{R2} \end{aligned} \tag{3.50}$$

Bu ölçü kombinasyonu hem iyonosfer bağımsızlık hem de geometriden bağımsızlık sağlar (Teunissen & Oliver, 2017). MW kombinasyonu ile uydu alıcı arası mesafe fonksiyonel modeli Denklem (3.51)'de verilmektedir.

$$LR_{MW} = -\lambda_{WL}\left(N_{r\,L1}^s - N_{r\,L2}^s\right) = -\lambda_{WL}\left(N_{r\,MW}^s\right) \tag{3.51}$$

Denklem (3.51) bağıntısında tam olmayan dalga sayısı $\left(N_{r\,L1}^s - N_{r\,L2}^s\right)$, $N_{r\,MW}^s$ şeklinde gösterilmiştir. Bu ifade Wide-Lane dalga boyu $-\lambda_{WL}$ ile çarpılırsa metre biriminde hata fonksiyonel modele eklenmiş olur. Bununla birlikte $N_{A\,MW}^j$ belirsizliğini etkileyen uydu ve alıcılar için saat kayıklıkları bulunmaktadır. Uydular için kayıklık b_{Mw}^s ifadesi ile, alıcılar için kayıklık b_{Mw}^r ifadesi ile fonksiyonel modele eklenir.

$$\begin{aligned} LR_{MW} &= -\lambda_{WL}\left(N_{r\,L1}^s - N_{r\,L2}^s\right) \\ &= -\lambda_{WL}\left(N_{r\,MW}^s\right) + (\mathrm{b}_{Mw}^r - \mathrm{b}_{Mw}^s) + \varepsilon \end{aligned} \tag{3.52}$$

Söz konusu saat kayıklıkları doğrudan tamsayı belirsizliğini etkilediği için tek alıcı ile ölçüm yapılması PPP tekniğinde oldukça önemlidir. Bu kayıklıkların faz dalga sayısının tamsayı değerini bozmaması için belirsizlikten ayırmak gerekecektir.

3.1.3 Tamsayı Belirsizliği Çözümü için Matematiksel Modeller

GNSS uydu alıcı arası mesafe kod ve faz olmak üzere iki farklı sinyal ile bulunur. Kod gözlemleri her uydudan P kod ve C/A kod olarak yayınlanarak navigasyon mesajı üretilmesini sağlayan dijital/kesikli sinyallerdir. Faz sinyalleri kod sinyallerinden farklı olarak üzerinde bilgi taşıyan analog/sürekli sinyaller olup doğruluğu kod ölçülerine göre daha fazla ancak daha çok hataya maruz kalabilen

sinyallerdir. Kod ölçüleri ve faz ölçülerine ait matematiksel modeller Denklem (3.53), (3.54), (3.55) ve (3.56) eşitliliklerinde gösterilmiştir.

$$R_1 = \rho^s(t,t^s) + c\left(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}\right) + Z_r^s + I_r^s + b_{R1}^r - b_{R1}^s + TGD + \varepsilon \tag{3.53}$$

$$R_2 = \rho^s(t,t^s) + c\left(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}\right) + Z_r^s + I_r^s + b_{R2}^r - b_{R2}^s + TGD + \varepsilon \tag{3.54}$$

$$L_1 = \rho^s(t_r,t^s) + c\left(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}\right) + Z_r^s - I_r^s - \lambda_1 N_r^s + b_{L1}^r - b_{L1}^s + TGD + \varepsilon \tag{3.55}$$

$$L_2 = \rho^s(t_r,t^s) + c\left(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}\right) + Z_r^s - I_r^s - \lambda_1 N_r^s + b_{L1}^r - b_{L1}^s + TGD + \varepsilon \tag{3.56}$$

Ham kod ve faz ölçülerinde görülen bazı hataları gidermek için kod ve faz kombinasyonları kurulmuştur. Bu kombinasyonlar Denklem (3.57)'de gösterilmiştir.

$$R = \alpha R_1 + \beta R_2$$
$$L = \alpha L_1 + \beta L_2 \tag{3.57}$$

$$\alpha = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad \beta = -\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \tag{3.58}$$

α ve β'nın aldıkları değerlere göre farklı matematiksel modeller üretilmektedir. Faz ve kod kombinasyonlarına ait matematiksel modeller Faz ve Kod Ölçüleri için IF Kombinasyonu ve MW Kombinasyonu başlığı altında detaylı anlatılmıştır.

Literatürde tamsayı belirsizliğinin çözümü için dört farklı modelden bahsedilir. Bunların ilki geleneksel PPP'nin tamsayı belirsizliği çözümüdür. Diğer çözüm modelleri PPP-AR tekniği altında SDBS, PCM ve DCM olarak isimlendirilmiştir. Tamsayı belirsizliğini etkileyen FCB değerinden kaynaklı olarak bu modellerin fonksiyonel modelleri birbirinden ayrışır. FCB değerinin kestirimi tamsayı belirsizliğinin çözümü için oldukça önemlidir.

3.1.3.1 PPP Tamsayı belirsizlik çözümü

Geleneksel PPP olarak isimlendirilmiş teknik aslında IF kombinasyonu ile üretilmiş bir matematiksel modeldir. Kouba ve Heroux (2001) tarafından önerilen bu model çift frekanslı alıcılarda hem kod ölçülerinde hem de faz ölçülerinde iyonosferik etkiyi yüksek oranda elimine eden bir tekniktir (Odijk, 2003; Teunissen ve Odijk, 2003). Tüm PPP çözüm yöntemleri IF kombinasyonuna ihtiyaç duyar (Nykiel & Figurski, 2016). Denklem (3.57) bağıntısında α ve β ifadeleri yerine Denklem (3.58)'deki ifadeler yazılarak Denklem (3.59) oluşturulur.

$$L_{IF} = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2}, \quad R_{IF} = \frac{f_1^2 R_1 - f_2^2 R_2}{f_1^2 - f_2^2} \tag{3.59}$$

Burada L_1 ve L_2'nin aynı zamanda R_1 ve R_2'nin kombinasyonları alınırken uydu ve alıcılar için kayıklıkların da kombinasyonu alınır. Bu durumda b_{R-IF}^r, b_{R-IF}^s ve $\mathrm{b}_{L-IF}^r, \mathrm{b}_{L-IF}^s$ ifadeleri için Denklem (3.60), (3.61), (3.62) ve (3.63) bağıntıları oluşturulur.

$$b_{R-IF}^r = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{R1}^r - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{R2}^r \tag{3.60}$$

$$b_{R-IF}^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{R1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{R2}^s \tag{3.61}$$

$$b_{L-IF}^r = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{L1}^r - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{L2}^r \tag{3.62}$$

$$b_{L-IF}^s = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{L1}^s - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} b_{L2}^s \tag{3.63}$$

Denklem (3.60), (3.61), (3.62) ve (3.63) bağıntıları IF kombinasyonu alınmış kod ve faz denklemlerinde yerlerine yazılırsa IF matematiksel modeli Denklem (3.64) ve (3.65)'de gösterildiği gibi oluşturulur.

$$R_{IF} = \rho^s(t, t^s) + c\left(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}\right) + Z_r^s + b_{R-IF}^r - b_{R-IF}^s + \varepsilon \tag{3.64}$$

$$L_{IF} = \rho^s(t, t^s) + c\left(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}\right) + Z_r^s + \lambda_{IF} N_3 + \mathrm{b}_{L-IF}^r + \mathrm{b}_{L-IF}^s + \varepsilon \tag{3.65}$$

IF kombinasyonuna ait dalga boyu uzunluğu Denklem (3.66)'da gösterildiği gibidir.

$$\lambda_{IF} = \frac{c}{2f_0(f_1^2 - f_2^2)} = 0.63\ cm \tag{3.66}$$

IF kod ve faz gözlemlerinde aynı alıcı saati ve aynı uydu saati kullanıldığında kod ve faz matematiksel modeli Denklem (3.67) ve (3.68)'de ifade edilmiştir.

$$R_{IF} = \rho^s(t, t^s) + c\big((\varsigma_r - b^r_{R-IF}) - (\varsigma^s + b^s_{R-IF}) + \Delta t_{ref}\big) + Z^s_r + \varepsilon \tag{3.67}$$

$$L_{IF} = \rho^s(t, t^s) + c\left((\varsigma_r - b^r_{R-IF}) - (\varsigma^s + b^s_{R-IF}) + \Delta t_{ref}\right) + Z^s_r - \lambda_{IF}N_3 + (\mathrm{b}^r_{L-IF} - \mathrm{b}^r_{R-IF}) + (\mathrm{b}^s_{L-IF} - \mathrm{b}^s_{R-IF}) + \varepsilon \tag{3.68}$$

Denklem (3.67) bağıntısında uydu saat hatası $(\varsigma^s + b^s_{R-IF})$ IGS saat ürünleri tarafından hesaplanarak çözüme dahil edilir. Bilinmeyen parametreler alıcı koordinatları, alıcı saat hataları ve IF tamsayı bilinmeyenidir. Troposferik hata (Z^s_r) ve rölativite etkisi (Δt_{ref}) belirli modeller üzerinden hesaplanabilir.

Geleneksel PPP'de alıcı ve uydu saat kayıklıkları $((\varsigma_r - b^r_{R-IF})$ ve $(\varsigma^s + b^s_{R-IF}))$ temel kod saatlerini içeren hata parametresidir. Bu hata parametreleri faz ölçüsüne de dahil edilir. Bu sebepten alıcı ve uydu kod-faz kayıklıkları belirsizlik parametresi içerisinde kaybolur. Başka bir ifade ile tamsayı belirsizliği $\lambda_{IF}N_3 + (\mathrm{b}^r_{L-IF} - \mathrm{b}^r_{R-IF}) + (\mathrm{b}^s_{L-IF} - \mathrm{b}^s_{R-IF})$ ifadesinin tamamını içerir. Bu ifade Denklem (3.20) bağıntısında gösterilmiştir. Ancak geleneksel PPP'de FCB değerlerine dikkat edilmez. Buna bağlı olarak kestirilen belirsizlik parametresi kombine belirsizlik ürünüdür. Bu yüzden tamsayı belirsizlik çözümü IF kombinasyonunda tam olarak kestirilemeyebilir (Shi, 2012).

3.1.3.2 DCM (Decouple Clock Model)

Geleneksel PPP'de FCB değerleri tamsayı belirsizliği içerisinde kaybolur. Tamsayı belirsizliği çözümünde uydu ve alıcıların FCB değerleri belirsizliğin tamsayısını etkiler. Bu yönüyle uydu ve alıcıların FCB değerleri tamsayı bilinmeyeninden ayrıştırılmalıdır. Buradan yola çıkarak Collins (2008) DCM olarak isimlendirdiği bir model yayınlamıştır. DCM tamsayı belirsizlik modelinde kod ve faz IF

kombinasyonuna ilaveten bir tane MW kombinasyonu kullanılır. IF kombinasyonuna ait eşitlikler 3.1.1 başlığı altında, MW kombinasyonuna ait eşitlikler 3.1.2 başlığı altında gösterilmiştir.

DCM modelde kullanılan iki IF kombinasyonu Denklem (3.69) ve (3.70)'de verilmektedir.

$$R_{IF} = \rho^s(t,t^s) + c\left((\varsigma_r - b^r_{R-IF}) - (\varsigma^s + b^s_{R-IF}) + \Delta t_{ref}\right) + Z^s_r + \varepsilon \qquad (3.69)$$

$$L_{IF} = \rho^s(t,t^s) + c\left(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}\right) + Z^s_r - \lambda_{IF}N_3 + (\mathrm{b}^r_{L-IF} - \mathrm{b}^s_{L-IF}) + \varepsilon \qquad (3.70)$$

Geleneksel PPP'de tamsayı belirsizliği çözümünde kullanılan $\lambda_{IF}N_3$ ifadesi ($\lambda_{IF} = \frac{c}{2f_0(f_1^2 - f_2^2)} = 0.63\ cm$) L_1 ve L_2 kombinasyonundan yola çıkarak iki farklı tamsayı ifadesine dönüştürülür.

$$\begin{aligned}
\lambda_{IF}N_3 &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}\lambda_1 N_1 + \frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\lambda_2 N_2 \\
&= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}\frac{c}{2f_1 f_0}N_1 + \frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}\frac{c}{2f_2 f_0}N_2 \\
&= \frac{c}{2f_0(f_1^2 - f_2^2)}(77N_1 - 60N_2) \\
&= \lambda_{IF}(77N_1 - 60N_2) = \\
&= \lambda_{IF}[17N_1 + (60N_1 - 60N_2)] \\
&= \lambda_{IF}(17N_1 - 60N_{WL})
\end{aligned} \qquad (3.71)$$

$\lambda_{IF}N_3$ ifadesi IF Denklem (3.70)'de yerine yazılırsa Denklem (3.72) oluşturulur.

$$L_{IF} = \rho^s(t,t^s) + c\left(\varsigma_r - \varsigma^s + \Delta t_{ref}\right) + Z^s_r - \lambda_{IF}(17N_1 - 60N_{WL}) + (\mathrm{b}^r_{L-IF} - \mathrm{b}^s_{L-IF}) + \varepsilon \qquad (3.72)$$

Kod ve faz olmak üzere iki adet IF ve bir adet MW kombinasyonu düşünüldüğünde tüm bilinmeyen parametreler alıcı koordinatları, alıcı ve uydu saat hataları, alıcı ve uydu saat kayıklıkları (FCB) tamsayı belirsizliğidir. Burada bilinmeyen parametre sayısı gözlem sayısından daha fazla olduğu için datum problemi ortaya çıkar. Datum problemini çözebilmek için iki spesifik işlem gerekir. Birincisi parametre

yapılandırmasıdır. Ayrıştırılmış kod-faz ölçüsüne ait saat hataları ve alıcı-uydu kod-faz kayıklıkları kombine edilerek Denklem (3.73) ve (3.74) oluşturulur.

$$dt^r_{R-IF} = \varsigma_r - b^r_{R-IF}, \qquad dt^s_{R-IF} = \varsigma^s + b^s_{R-IF} + \Delta t_{ref} \tag{3.73}$$

$$dt^r_{L-IF} = \varsigma_r - b^r_{L-IF}, \qquad dt^s_{L-IF} = \varsigma^s + b^s_{L-IF} + \Delta t_{ref} \tag{3.74}$$

Denklem (3.73) ve (3.74)'deki eşitlikler, Denklem (3.69) ve (3.70)'de yerine yazılarak DCM IF matematiksel modeli oluşturulur. Ayrıca DCM MW matematiksel modeli de 3.1.2 başlığı altından alınmıştır.

$$R_{IF} = \rho^s(t, t^s) + c(dt^r_{R-IF} - dt^s_{R-IF}) + Z^s_r + \varepsilon \tag{3.75}$$

$$L_{IF} = \rho^s(t, t^s) + c(dt^r_{L-IF} - dt^s_{L-IF}) + Z^s_r - \lambda_{IF}(17N_1 - 60N_{WL}) + \varepsilon \tag{3.76}$$

$$LR_{MW} = -\lambda_{WL} N_{MW} + (\mathrm{b}^r_{MW} - \mathrm{b}^s_{MW}) + \varepsilon \tag{3.77}$$

Denklem (3.75), (3.76) ve (3.77)'de gösterilen matematiksel modele göre bilinmeyen sayısı düşürülmüştür. Ayrıca troposferik gecikmede hazır modeller üzerinden hesaplanırsa bilinmeyen parametre sayısı bir eksilir. Ancak buna rağmen bilinmeyen sayısı ölçü sayısından fazladır. Örneğin n adet uydu gözlenmiş olsun toplamda 3n uydu gözlem denklemi (R_{IF}, L_{IF} ve LR_{MW}) oluşacaktır. Bu denklemlerde bilinmeyen parametreler 3 koordinat bilinmeyeni, 3 alıcı DCM saat bilinmeyeni, 3n uydu DCM saat bilinmeyeni, 2n tamsayı bilinmeyeni olmak üzere toplamda 6+5n bilinmeyen söz konusudur. Datum problemi devam etmektedir.

Datum problemini giderebilmek için birinci işleme ek olarak, bir tane referans uydu seçilmelidir. Bu referans uydunun N_1 ve N_{WL} değerleri tamsayı seçilmelidir. Bununla birlikte N_1 ve N_{WL} datum probleminden dolayı ayrı ayrı çözülmelidir. Böylece Datum problemi giderilebilir.

Uydu saat hata yükünü azaltmak için uydu kod saati (dt^s_{R-IF}) Denklem (3.78) ile ayrıştırılabilir.

$$dt^s_{R-IF} = dt^s_{L-IF} + b^s_{code} \tag{3.78}$$

Denklem (3.78) bağıntısı DCM matematiksel modelinde yerine yazılarak Denklem (3.79), (3.80) ve (3.81) oluşturulur.

$$R_{IF} = \rho^s(t,t^s) + c\left(dt^r_{R-IF} - (dt^s_{L-IF} + b^s_{code})\right) + Z^s_r + \varepsilon \tag{3.79}$$

$$L_{IF} = \rho^s(t,t^s) + c(dt^r_{L-IF} - dt^s_{L-IF}) + Z^s_r - \lambda_{IF}(17N_1 - 60N_{WL}) + \varepsilon \tag{3.80}$$

$$LR_{MW} = -\lambda_{Mw}N_{MW} + (\mathrm{b}^r_{MW} - \mathrm{b}^s_{MW}) + \varepsilon \tag{3.81}$$

Uydu DCM saat ürünleri (dt^s_{L-IF}, b^s_{code} ve b^s_{MW}) farklı servisler tarafından ağ çözümünden belirlendikten sonra kullanıcılara yayınlanır (Shi, 2012). Bu aşamada bilinmeyenler: alıcı koordinatları, alıcı DCM saat ürünleri (dt^r_{L-IF}, dt^r_{R-IF}, ve b^r_{MW}) ve belirsizliklerdir.

3.1.3.3 SDBS (Single Difference Between Satellites)

Ge vd. (2008)'de PPP tamsayı belirsizliği çözümü için önerilen SDBS modelinde IF kombinasyonunu ve MW kombinasyonunu ardışık olarak kullanılır. SDBS modeli ile öncelikle N_3 belirsizliğinin tam değerini kestirilir (Shi, 2012). Sonrasında uydu FCB doğruluğunu onaylayarak tamsayı özelliği problemi giderilir. Denklem (3.82) ve (3.83)'de IF kombinasyonu alınmış kod ve faz bağıntıları gösterilmiştir.

$$R_{IF} = \rho^s(t,t^s) + c\left((\varsigma_r - b^r_{R-IF}) - (\varsigma^s + b^s_{R-IF}) + \Delta t_{ref}\right) + Z^s_r + \varepsilon \tag{3.82}$$

$$L_{IF} = \rho^s(t,t^s) + c\left((\varsigma_r - b^r_{R-IF}) - (\varsigma^s + b^s_{R-IF}) + \Delta t_{ref}\right) + Z^s_r - \lambda_{IF}N_3 + (\mathrm{b}^r_{L-IF} - \mathrm{b}^r_{R-IF}) + (\mathrm{b}^s_{L-IF} - \mathrm{b}^s_{R-IF}) + \varepsilon \tag{3.83}$$

SDBS çözümü ardışık çözüm için N_3 tamsayı belirsizliğini $17N_1 + 60N_{WL}$ olarak iki kısma ayırır. Böylece L_{IF} bağıntısı Denklem (3.84) olarak elde edilir.

$$L_{IF} = \rho^s(t,t^s) + c\left((\varsigma_r - b^r_{R-IF}) - (\varsigma^s + b^s_{R-IF}) + \Delta t_{ref}\right) + Z^s_r - \lambda_{IF}(17N_1 + 60N_{WL}) + (\mathrm{b}^r_{L-IF} - \mathrm{b}^r_{R-IF}) + (\mathrm{b}^s_{L-IF} - \mathrm{b}^s_{R-IF}) + \varepsilon \tag{3.84}$$

Datum problemi durumu nedeniyle N_1 ve N_{WL} eş zamanlı değil ardışık olarak çözülür. Bu aşamada öncelikle Wide-Lane belirsizlik (N_{WL}) çözümü gerçekleştirilir. Ardından N_1 belirsizlik çözülür. Burada N_{WL} çözülürken uydu ve alıcı kayıklık ürünlerinin kestirilmesi Wide-Lane FCB kestirimi olarak isimlendirilir.

N_{WL} tamsayı belirsizliği dalga boyu (86.9 cm) büyük olması sebebiyle farklı uydulardan MW kombinasyonun tekli farkı alınarak çözülür. MW kombinasyonu ile uydu alıcı arası mesafe fonksiyonel modeli i ve j uyduları için Denklem (3.85) ve (3.86)'da gösterilmiştir.

$$LR_{MW}{}^{i} = -\lambda_{WL}{}^{i} N_{WL}{}^{i} + \left(\mathrm{b}_{MW}^{r} - \mathrm{b}_{MW}^{s}{}^{i}\right) + \varepsilon \tag{3.85}$$

$$LR_{MW}{}^{j} = -\lambda_{WL}{}^{j} N_{WL}{}^{j} + \left(\mathrm{b}_{MW}^{r} - \mathrm{b}_{MW}^{s}{}^{j}\right) + \varepsilon \tag{3.86}$$

Burada alıcı kayıklık değerlerinden kurtulmak gerekecektir. i ve j uydularının farkları alınırsa b_{MW}^{r} alıcı kayıklığı kaybolur. İki uydunun tekli farklar matematiksel modeli Denklem (3.87) bağıntısına dönüşür.

$$\triangle LR_{MW}{}^{i,j} = -\lambda_{WL}{}^{i,j} \triangle N_{WL}{}^{i,j} - \triangle \mathrm{b}_{MW}^{s}{}^{i,j} + \varepsilon \tag{3.87}$$

Buradaki uydu kayıklığı ($\mathrm{b}_{MW}^{s}{}^{i,j}$) diğer adıyla Wide-Lane FCB değerini bulmak için birden fazla epoktaki uydu kayıklık değerlerinin ortalaması alınır. $N_{WL}{}^{i,j}$ ifadesinin yakınsaması için belirli bir süreye ihtiyaç duyulur.

$$\triangle LR_{MW}{}^{i,j} + \triangle \mathrm{b}_{MW}^{s}{}^{i,j} = -\lambda_{WL}{}^{i,j} \triangle N_{WL}{}^{i,j} \tag{3.88}$$

Denklem (3.88)'de $\mathrm{b}_{MW}^{s}{}^{i,j}$ ifadesi ilk başta sıfır kabul edilir (Shi, 2012). $\triangle LR_{MW}{}^{i,j}$ değeri en yakın tamsayı değerine yuvarlanarak bulunur.

$$\begin{aligned} \triangle N_{WL}{}^{i,j} &= -\frac{1}{\lambda_{WL}{}^{i,j}} \langle \triangle LR_{MW}{}^{i,j} \rangle \\ -\lambda_{WL}{}^{i,j} \triangle N_{WL}{}^{i,j} &= \langle \triangle LR_{MW}{}^{i,j} \rangle \end{aligned} \tag{3.89}$$

Denklem (3.89) da gösterilen $\langle \triangle {LR_{MW}}^{i,j} \rangle$ ifadesi tamsayıya yuvarlama işlemini ifade eder. Denklem (3.89) ile $\triangle {N_{WL}}^{i,j}$ belirsizliği çözülmüş olur, sonra metre biriminde uydu Wide-Lane FCB değerleri Denklem (3.90) ile gösterilir.

$$\triangle {\mathrm{b}_{MW}^{s}}^{i,j} = - \triangle {LR_{MW}}^{i,j} + \langle \triangle {LR_{MW}}^{i,j} \rangle \tag{3.90}$$

Tek bir alıcıdan Wide-Lane FCB değerinin hesaplanması için bu eşitlik kullanılır. Burada dalga boyu biriminde Wide-Lane FCB değerini bulmak için $-\frac{1}{\lambda_{WL}}$ ifadesi ile çarpılmalıdır. Bir ağda birden fazla alıcıdan ortalama alınarak Wide-Lane FCB değeri üretilebilir. Böylece ${\mathrm{b}_{MW}^{s}}^{i,j}$ ifadesi tüm ağdan ortalama alınarak elde edilir.

$$\triangle {LR_{MW_usr}}^{i,j} = -{\lambda_{WL}}^{i,j} \triangle {N_{WL_usr}}^{i,j} - \triangle {\mathrm{b}_{MW}^{s}}^{i,j} + \varepsilon \tag{3.91}$$

Bir ağ üzerinde tüm alıcılardan i ve j uyduları arası fark alınarak Denklem (3.91) bağıntısı kurulmuştur. Bu denklemde ${\mathrm{b}_{MW}^{s}}^{i,j}$ ifadesini denklemin sol tarafına atılırsa Denklem (3.92) bağıntısı oluşturulur.

$$\triangle {LR_{MW_usr}}^{i,j} + \triangle {\mathrm{b}_{MW}^{s}}^{i,j} = -{\lambda_{WL}}^{i,j} \triangle {N_{WL_usr}}^{i,j} + \varepsilon \tag{3.92}$$

Denklem (3.90)'daki $\triangle {\mathrm{b}_{MW}^{s}}^{i,j}$ ifadesi Denklem (3.92) da yerine yazılarak Denklem (3.93) elde edilir.

$$\begin{aligned} &\triangle {LR_{MW_usr}}^{i,j} + (- \triangle {LR_{MW}}^{i,j} + \langle \triangle {LR_{MW}}^{i,j} \rangle) \\ &\qquad = -{\lambda_{WL}}^{i,j} \triangle {N_{WL_usr}}^{i,j} + \varepsilon \end{aligned} \tag{3.93}$$

Denklem (3.89)'daki $\langle \triangle {LR_{MW}}^{i,j} \rangle$ ifadesi Denklem (3.93)'de yerine yazılarak Denklem (3.94) elde edilir.

$$\begin{aligned} &\triangle {LR_{MW_usr}}^{i,j} - \triangle {LR_{MW}}^{i,j} \\ &\qquad = -{\lambda_{WL}}^{i,j} \triangle {LR_{WL_usr}}^{i,j} + {\lambda_{WL}}^{i,j} \triangle {N_{WL}}^{i,j} + \varepsilon \end{aligned} \tag{3.94}$$

$\triangle {N_{WL}}^{i,j}$ belirsizliği sabitlendikten sonra bilinen parametre olarak çözüme dahil edilir. Bu aşamadan sonra N_1 belirsizliğine geçilebilir. N_1 belirsizliğinin çözümü için IF kombinasyonu kullanılarak i ve j uyduları arasında tekli fark alınır. Burada uydu ve alıcı kayıklık ürünlerinin kestirilmesi Narrow-Lane FCB olarak da isimlendirilebilir.

$$LR_{IF}{}^{i} = -\lambda_{IF} N_3{}^{i} + \left(\mathrm{b}_{L-IF}^{r}{}^{i} - \mathrm{b}_{P-IF}^{r}{}^{i}\right) - \left(\mathrm{b}_{L-IF}^{s}{}^{i} - \mathrm{b}_{P-IF}^{s}{}^{i}\right) + \varepsilon \quad (3.95)$$

$$LR_{IF}{}^{j} = -\lambda_{IF} N_3{}^{j} + \left(\mathrm{b}_{L-IF}^{r}{}^{j} - \mathrm{b}_{P-IF}^{r}{}^{j}\right) - \left(\mathrm{b}_{L-IF}^{s}{}^{j} - \mathrm{b}_{P-IF}^{s}{}^{j}\right) + \varepsilon \quad (3.96)$$

LR_{IF} ifadesi bir kombinasyon ürünü değildir. Faza ait matematiksel fonksiyonun tamsayı belirsizliğini ifade eden kısmıdır. Dolayısıyla bir ölçüyü ifade etmez. Denklem (3.95) ve (3.96) çözümü için öncelikle IF çözümüne ait tamsayı belirsizliği kestirimi yapılması gerekmektedir. IF çözümünün tamsayı belirsizliğine ulaşıldıktan sonra uydular arası tekli fark alınabilir. Uydular arası tekli fark alma yöntemi uygulandığı için alıcıya ait kod ve faz kayıklıklarının ($\triangle \mathrm{b}_{L-IF}^{r}{}^{i,j} - \triangle \mathrm{b}_{P-IF}^{r}{}^{i,j}$) ifadeleri kaybolur. i ve j uydularına ait tekli fark alınmış fonksiyonel model Denklem (3.97)'de ifade edilmiştir.

$$\begin{aligned} \triangle LR_{IF}{}^{i,j} = -17\lambda_{IF} \triangle N_1{}^{i,j} - 60\lambda_{IF} \triangle N_{\mathrm{WL}}{}^{i,j} \\ - \left(\triangle \mathrm{b}_{L-IF}^{s}{}^{i,j} - \triangle \mathrm{b}_{P-IF}^{s}{}^{i,j}\right) + \varepsilon \end{aligned} \quad (3.97)$$

Denklem (3.97)'de $60\lambda_{IF} \triangle N_{\mathrm{WL}}{}^{i,j}$ değeri bir önceki adımda ağ noktalarından hesaplanmaktadır. Bulunan değer yerine yazılarak eşitliğin sol tarafına atılırsa Denklem (3.98) ifadesine ulaşılır.

$$\begin{aligned} \triangle LR_{IF}{}^{i,j} + 60\lambda_{IF} \triangle N_{WL}{}^{i,j} \\ = -17\lambda_{IF} \triangle N_1{}^{i,j} - \left(\triangle \mathrm{b}_{L-IF}^{s}{}^{i,j} - \triangle \mathrm{b}_{P-IF}^{s}{}^{i,j}\right) + \varepsilon \end{aligned} \quad (3.98)$$

Bu denklemde $\triangle N_{WL}$ ifadesi bilinmektedir. $\triangle LR_{IF}{}^{i,j} + 60\lambda_{IF} \triangle N_{WL}{}^{i,j}$ ifadesi yerine $\triangle LR_{A1}{}^{i,j}$olarak kısaltılır. $\triangle N_1{}^{i,j}$'in bulunması için uydu kod ve faz kayıklıkları ($\triangle \mathrm{b}_{L-IF}^{s}{}^{i,j} - \triangle \mathrm{b}_{P-IF}^{s}{}^{i,j}$) bilinmelidir. SDBS modelinin kilit basamağı buradaki uydu kod ve faz kayıklıklarının ($\triangle \mathrm{b}_{L-IF}^{s}{}^{i,j} - \triangle \mathrm{b}_{P-IF}^{s}{}^{i,j}$) bulunmasıdır. Uydu kod ve faz kayıklıkları $\triangle \mathrm{b}_{A1}^{s}{}^{i,j}$ olarak kısaltılırsa Denklem (3.99)'a ulaşılır.

$$\begin{aligned} \triangle LR_{IF}{}^{i,j} + 60\lambda_{IF} \triangle N_{\mathrm{WL}}{}^{i,j} = \triangle LR_{A1}{}^{i,j} \\ = -17\lambda_{IF} \triangle N_1{}^{i,j} + \triangle \mathrm{b}_{A1}^{s}{}^{i,j} \end{aligned} \quad (3.99)$$

N_{WL}'ün FCB'lerinin bulunmasında uygulanan en yakın tamsayı değerine yuvarlama işlemi N_1'in bulunmasında da uygulanır ve bunun için belirli bir yakınsama süresine ihtiyaç duyulur.

$$\triangle {N_1}^{i,j} = \frac{1}{-17\lambda_{IF}} \langle \triangle {LR_{A1}}^{i,j} \rangle \tag{3.100}$$

Denklem (3.100)'de $\langle \triangle {LR_{A1}}^{i,j} \rangle$ ifadesi en yakın tamsayıya yuvarlama işleminden sonra $\triangle {N_1}^{i,j}$ değerine ulaşılır. Narrow-Lane FCB değerleri metre biriminde Denklem (3.101) gösterilir.

$$\triangle {\mathrm{b}_{A1}^{s}}^{i,j} = \triangle {LR_{A1}}^{i,j} + \langle \triangle {LR_{A1}}^{i,j} \rangle \tag{3.101}$$

Metre birimindeki bu değeri $\frac{1}{-17\lambda_{IF}}$ ile çarpılırsa kaç dalga olduğu hesaplanır. Bir ağda birden fazla alıcıdan ortalama alınarak Narrow-Lane FCB değeri üretilebilir. Böylece $\triangle {\mathrm{b}_{A1}^{s}}^{i,j}$ ifadesi tüm ağdan ortalama alınarak elde edilir.

$$\triangle {LR_{A1_usr}}^{i,j} = -{\lambda_{IF}}^{i,j} \triangle {N_{1_usr}}^{i,j} - \triangle {\mathrm{b}_{A1}^{s}}^{i,j} + \varepsilon \tag{3.102}$$

Burada $\triangle {N_{1_usr}}^{i,j}$ ifadesi ağ üzerindeki tamsayı belirsizliğini ve LR_{A1_usr} ifadesi ağ üzerindeki MW kombnasyonunu temsil etmektedir. Bir ağ üzerinde tüm alıcılardan i ve j uyduları arası fark alınarak Denklem (3.106) bağıntısı kurulmuştur. Bu denklemde ${\mathrm{b}_{A1}^{s}}^{i,j}$ ifadesini denklemin sol tarafına atılırsa Denklem (3.107) bağıntısı oluşturulur.

$$\triangle {LR_{A1_usr}}^{i,j} + \triangle {\mathrm{b}_{A1}^{s}}^{i,j} = -{\lambda_{IF}}^{i,j} \triangle {N_{1_usr}}^{i,j} + \varepsilon \tag{3.103}$$

Denklem (3.106)'daki $\triangle {\mathrm{b}_{A1}^{s}}^{i,j}$ ifadesi Denklem (3.107)'de yerine yazılarak Denklem (3.108) elde edilir.

$$\begin{aligned} \triangle {LR_{A1_usr}}^{i,j} + (-\triangle {LR_{A1}}^{i,j} + \langle \triangle {LR_{A1}}^{i,j} \rangle) \\ = -{\lambda_{IF}}^{i,j} \triangle {N_{1_usr}}^{i,j} + \varepsilon \end{aligned} \tag{3.104}$$

Denklem (3.100)'deki $\langle \triangle {LR_{A1}}^{i,j} \rangle$ ifadesi Denklem (3.108)'de yerine yazılarak Denklem (3.109) elde edilir.

$$\triangle LR_{A1_usr}{}^{i,j} - \triangle LR_{A1}{}^{i,j} = -\lambda_{IF}{}^{i,j} \triangle N_{1_{usr}}{}^{i,j} + \lambda_{IF}{}^{i,j} \triangle N_1{}^{i,j} + \varepsilon \qquad (3.105)$$

Böylece $\triangle N_1{}^{i,j}$ ve $\triangle N_{WL}{}^{i,j}$ tamsayı bilinmeyenlerine ulaşılır.

3.1.3.4 PCM (Phase Clock Model)

PCM Laurichesse vd. (2009) tarafından tamsayı belirsizliği çözümü için önerilmiş bir modeldir. Bu model de SDBS modeline benzer olarak IF kombinasyonuna ek olarak MW kombinasyonu kullanır. Buna bağlı olarak L_1 sinyaline ait belirsizlik (N_1) ve Wide-Lane belirsizlik (N_{WL}) tamsayı bilinmeyenlerinin çözülmesi söz konusudur. Ancak burada uydular arası fark alma tekniği kullanılmaz. Fark almaksızın MW kombinasyonu kullanılır. MW kombinasyonu ile uydu alıcı arası mesafe fonksiyonel modeli Denklem (3.85) bağıntısında gösterilmiştir. PCM çözümünün ilk adımında ($\mathrm{b}_{MW}^{r} - \mathrm{b}_{MW}^{s}$) kısmı yok sayılırsa; Wide-Lane tamsayı belirsizlik ifadesi Denklem (3.106)'da gösterildiği gibi olur.

$$N_{WL} = -\frac{1}{\lambda_{WL}} \langle LR_{MW} \rangle \qquad (3.106)$$

Denklem (3.106)'da Wide-Lane belirsizliğin tamsayı olması için LR_{MW} ifadesi en yakın tamsayı değerine yuvarlanır. Bilinmeyeni sabitlemek için alıcı ve uydu kayıklıkları ($\mathrm{b}_{MW}^{r} - \mathrm{b}_{MW}^{s}$) kesirli kısımdan ayrılmalıdır. Bunun için ise N_{WL} ifadesi yerine yazılırsa Denklem (3.107) ifadesine ulaşılır.

$$(\mathrm{b}_{MW}^{r} - \mathrm{b}_{MW}^{s}) = LR_{MW} - \langle LR_{MW} \rangle \qquad (3.107)$$

Denklem (3.107) bağıntısı ile uydu ve alıcı kayıklıklarının ($\mathrm{b}_{MW}^{r} - \mathrm{b}_{MW}^{s}$) sebep olduğu kesirli kısım ayrılmış olur. DCM çözüm modelinde olduğu gibi b_{MW}^{r} ve b_{MW}^{s} eş zamanlı çözülmesi datum problemi oluşturur. Bundan kaçınmak için referans kabul edilen alıcıya ait kayıklık (b_{MW}^{r}) değeri sıfır olarak alınır.

$$\mathrm{b}_{MW}^{s} = LR_{MW} - \langle LR_{MW} \rangle \qquad (3.108)$$

Denklem (3.108) bağıntısında Wide-Lane FCB (b_{MW}^{s}) sabit kabul edilerek ağdaki diğer alıcıların alıcı kayıklık (b_{MW}^{r}) değerleri bulunabilir. Sonuç olarak elimizde bir adet uydu kayıklığı ve ağdaki tüm alıcılara ait alıcı kayıklık değerleri kesirli olarak

bulunur. Bir ağdan alıcı kayıklık değeri elde etmek için Denklem (3.109)'da bağıntısı kullanılır.

$$LR_{MW_a\check{g}} = -\lambda_{WL} N_{WL_a\check{g}} + (\mathrm{b}^{r}_{MW_a\check{g}} - \mathrm{b}^{s}_{MW}) \tag{3.109}$$

Denklem (3.109) bağıntısında $\mathrm{b}^{r}_{MW_a\check{g}}$ ifadesi yalnız bırakılır ve $N_{WL_a\check{g}} = -\frac{1}{\lambda_{WL}}\langle LR_{MW} + \mathrm{b}^{s}_{MW}\rangle$ yerine yazılır.

$$LR_{MW_a\check{g}} + \mathrm{b}^{s}_{MW} + \lambda_{WL} - \frac{1}{\lambda_{WL}}\langle LR_{MW} + \mathrm{b}^{s}_{MW}\rangle = \mathrm{b}^{r}_{MW_a\check{g}} \tag{3.110}$$

Denklem (3.110) bağıntısında $\langle LR_{MW} + \mathrm{b}^{s}_{MW}\rangle$ ifadesi $LR_{MW_a\check{g}}$ ve b^{s}_{MW} değerlerinin toplanıp en yakın tamsayı değerine yuvarlanmış halidir.

İlk başta b^{s}_{MW}'yi bulmak için bir alıcının kayıklık (b^{r}_{MW}) değeri sıfır kabul edilmişti. Bulunan b^{s}_{MW} değeri kullanılarak ağdaki diğer alıcıların alıcı kayıklıkları ($\mathrm{b}^{r}_{MW_a\check{g}}$) kesirli olarak bulunmuştur. Tamsayı belirsizliğinin ($N_{WL_a\check{g}}$) bulunabilmesi için alıcı kayıklığının ($\mathrm{b}^{r}_{MW_a\check{g}}$) kesirli değerden kurtulması gerekir.

Bir alıcının tüm uydulara gözlemleri sırasında alıcının kayıklık değeri değişmez. Buna bağlı olarak m adet uydu gözleminin ortalama değeri alınarak Denklem (3.111) bağıntısı elde edilir.

$$\mathrm{b}^{r}_{MW_a\check{g}} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left[(LR_{MW_a\check{g}} + \mathrm{b}^{s}_{MW}) - \langle LR_{MW} + \mathrm{b}^{s}_{MW}\rangle\right] \tag{3.111}$$

Denklem (3.111) bağıntısı Denklem (3.109) bağıntısında yerine yazılırsa $N_{WL_a\check{g}}$ çözümüne ait bağıntı üretilmiş olur.

$$\begin{aligned} LR_{MW_a\check{g}} + \mathrm{b}^{s}_{MW} - \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left[(LR_{MW_a\check{g}} + \mathrm{b}^{s}_{MW}) - \langle LR_{MW} + \mathrm{b}^{s}_{MW}\rangle\right] \\ = -\lambda_{WL} N_{WL_a\check{g}} \end{aligned} \tag{3.112}$$

Denklem (3.112) bağıntısı ile $N_{WL_a\check{g}}$ değeri hala kesirli olarak bulunur. Bununla birlikte alıcı kayıklık değerine ($\mathrm{b}^{r}_{MW_a\check{g}}$) ulaşılmış olur. Wide-Lane belirsizlik (N_{WL}) kesirli olarak bulunduktan sonra N_1 sabitlenmesi aşamasına geçilir. PCM yöntemi N_1 çözüm aşamasında IF kombinasyonu kullanılır. Denklem (3.112)

bağıntısı ile bulunan $N_{WL_ağ}$ ifadesi eşitliğin sol tarafına atılarak faz ölçüsüne eklenir.

$$R_{IF} = \rho^s(t,t^s) + c(dt^r_{R-IF} - dt^s_{R-IF}) + Z^s_r + \varepsilon \tag{3.113}$$

$$L_{IF} + 60N_{WL} = \rho^s(t,t^s) + c(dt^r_{L-IF} - dt^s_{L-IF}) + Z^s_r - \lambda_{IF}17N_1 + \varepsilon \tag{3.114}$$

Denklem (3.113) ve (3.114) bağıntılarında troposferik gecikme ve uydu alıcı arası yaklaşık değer ifadesi hesaplanarak ölçüye eklenir. Böylece $(dt^r_{L-IF} - dt^s_{L-IF})$ ve $\lambda_{IF}17N_1$ ifadesi yalnız bırakılır.

$$(L_{IF} + 60N_{WL}) - (\rho^s(t,t^s) + Z^s_r) = c(dt^r_{L-IF} - dt^s_{L-IF}) - \lambda_{IF}17N_1 + \varepsilon \tag{3.115}$$

$$Q_3 = c(dt^r_{L-IF} - dt^s_{L-IF}) - \lambda_{IF}17N_1 + \varepsilon \tag{3.116}$$

Denklem (3.115) ve (3.116) bağıntılarında troposferik gecikme hazır modeller üzerinden bulunur ve uydu alıcı arası mesafe yaklaşık koordinatlar kestirilir. Uydu faz ölçüsüne ait saatini (dt^s_{L-IF}) belirlemek için üç adım uygulanır. İlk olarak bir tane referans alıcı seçilir ve alıcı saati (dt^r_{L-IF}) sıfır olur. İkinci olarak N_1 değerine keyfi bir değer atanır. Uydu faz ölçüsüne ait saati Denklem (3.117) bağıntısı ile çözülür.

$$Q_3 = c(dt^r_{L-IF} - dt^s_{L-IF}) - \lambda_{IF}17N_1 + \varepsilon \tag{3.117}$$

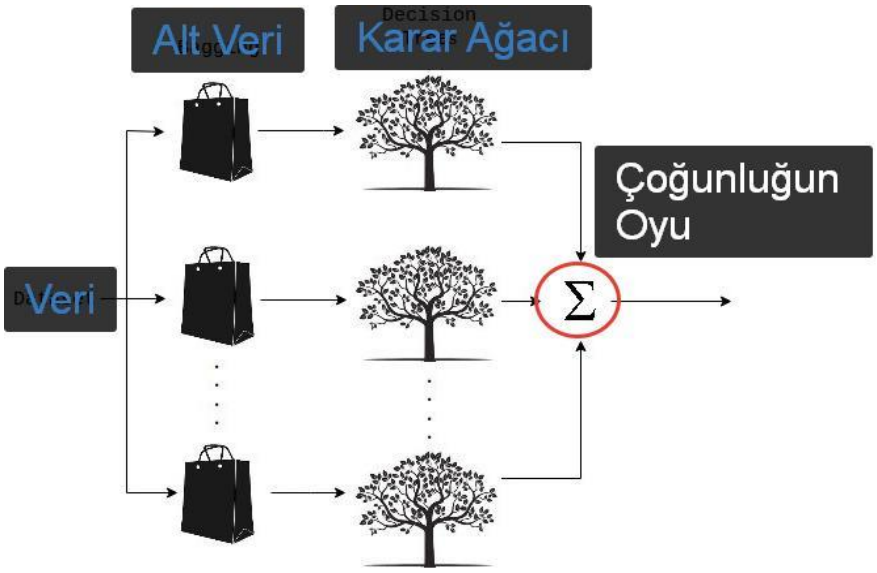
3.1.3.5 Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Güçlendirilmiş PPP-AR Çözümü

PPP-AR tekniği tamsayı belirsizliği Wide-Lane belirsizlik ve L_1 sinyalinin belirsizliği olarak iki kısımda çözülür. Belirsizliklerin çözülme başarısı Wide-Lane FCB değerinin ve Narrow-Lane FCB değerinin kestirilmesine bağlıdır. Wide-Lane belirsizlik çözümünde Wide-Lane FCB değeri kestirilirken, L_1 sinyali belirsizliğinin çözümünde Narrow-Lane FCB kestirilir. Bu başlık altında Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB kestirilirken kullanılması önerilen makine öğrenmesi algoritmalarından bahsedilmiştir.

- **Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB Kestirilmesinde Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Kullanılması**

Çalışmada SDBS modelinin N_{WL} ve N_1 çözümü aşamasında dört farklı makine öğrenimi algoritması test edilmiştir. SDBS modelinin N_{WL} çözüm aşamasında uydu kayıklık ürünlerinin kestirimi için Denklem (3.88)'de verilen ortalama değer kullanılmıştır. Bununla birlikte N_1 çözüm aşamasında uydu kayıklık ürünlerinin kestirimi için Denklem (3.100)'de verilen ortalama değer kullanılmıştır. Denklem (3.88) ve Denklem (3.100) bağıntısında uydu kayıklık ürünleri kestirilirken epok ortalaması kullanılmasına alternatif olarak her epok için RF (Random Forest) algoritması, SVM (Support Vector Machine) algoritması, DTree (Decision Tree) algoritması ve KNN (K Nearest Neighbours) kestirimleri incelenmiştir.

RF algoritması, karar ağaçları modelinde sınıflandırma ve regresyon işlemlerini yapabilen esnek ve kullanımı kolay makine öğrenmesi algoritmasıdır. Karar ağacı algoritması tek ağaçtan öğrenme ve sınıflandırma işlemi yapar. Ancak RF algoritması birden fazla ağaçtan doğru sonucu arayan bir sınıflandırma ve regresyon sürecini işletir. Belirli veri setinin alt kümelerinde çalışan karar ağaçlarının ortak çözümü ile çözüm hassasiyetinin artırılması amaçlanır. Buna kollektif öğrenme denir. Ormandaki ağaç sayısı 100'e kadar çıkartılabilir. Ancak ağaç sayısını artırmak her zaman doğru sonucu vermeyebilir. Çünkü ağaç sayısını artırmak veriyi ağaç sayısı kadar alt kümeye bölmek olacağı için doğruluktan uzaklaşabilir. Veri setinin büyüklüğüne ve doğruluğuna göre karar ağacı sayısını belirlemek gerekmektedir. Tüm veriden bir karar ağacı öğrenmesi yerine alt kümelerin her biri için farklı öğrenme algoritması çalıştırılmaktadır. Sonuç olarak karar ağaçlarındaki çoğunluğun oyunu kullanarak çözüm sağlanmaktadır (Purwanto vd., 2023). RF algoritmasında çoğunluğun oyu ile karar verilmektedir. Ancak DTree algoritmasında başka yaklaşımlarda kullanılmaktadır. RF algoritmasında alt karar ağaçları seçimiyle ilgili birçok çalışma devam etmektedir. Şekil 3.1'de RF algoritmasına ait bir regresyon örneği gösterilmiştir.



Şekil 3.1 RF algoritması regresyonu (Evren, 2022)

SVM algoritması başlangıçta sınıflandırma işlemi için tasarlanmış bir algoritmadır. Bu yönüyle doğrusal olarak ayrılabilecek iki sınıfın arasındaki en yakın komşuların aralığını belirleyerek maksimum marjin aralığını yakalamayı amaçlamaktadır. İki farklı sınıfı birbirinden ayırmak birden fazla doğrusal eğri ile olabilir. Ancak bu doğrusal eğriler arasında en yakın komşulara maksimum uzaklık sağlamayı amaçlar (Gaye vd., 2021). Bununla birlikte regresyona geçildiğinde maksimum noktayı alabilen marjin aralığını arama algoritması olarak karşımıza çıkar ve sınıflandırmadan farklı olarak minimum marjin aralığında maksimum veriyi temsil eden doğruyu çizebilmek amaçlanır. Denklem (3.118), (3.119), (3.120) ve (3.121)'de çizilebilecek doğrular ifade edilmiştir.

$$y = \sum_{i=1}^{N} a_i x_i + b \qquad Doğrusal\ SVR \tag{3.118}$$

$$y = \sum_{i=1}^{N} a_i K(x_i, x) + b \qquad Doğrusal\ olmayan\ SVR \tag{3.119}$$

$$K(x_i, x) = (x_i, x)^d \ \ polinomal \tag{3.120}$$

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(\frac{\|x_i - x_j\|}{2\,\sigma^2}\right)\ \ Gaussian\ Radial\ Basis\ Function\ (RBF) \tag{3.121}$$

Veri seti her zaman lineer bir doğru ile ifade edilemeyebilir. Doğrusal olmayan fonksiyonlar (3.119) denkleminde ifade edildiği gibi $K(x_i, x)$ fonksiyonu ile polinomal ve RBF (Radial Basic Function) olarak eğri oluşturabilir. Buna Kernel fonksiyonları denir. Kernel fonksiyonlardaki amaç farklı verilere en doğru modeli belirleyerek veriyi en hassas bir şekilde ifade eden denklemi çizdirmektir.

KNN regresyonu en yakın k adet komşunun değerine göre kestirim yapan algoritmadır. Buradaki k değeri komşu sayısını ifade eder. KNN algoritmasında iki farklı yöntem vardır. Bunlardan birincisi (Lazy Learning) hesaplanacak değerin veri seti içerisindeki en yakın komşular yardımıyla kestirilmesidir. İkinci yöntem (Eager Learning) ise veri setinde bir öğrenme adımı gerçekleştirildikten sonra regresyon ya da sınıflandırma yapılan yöntemdir. Bu tez çalışmasında Eager Learning yöntemi kullanılmıştır (Hu ve Hu, 2023). Ayrıca öğrenme işlemi yapılırken komşulara belirli ağırlık katsayısı verilebilir. Bu ağırlık katsayısı kestirilecek değere yakınlığı ile doğru orantılıdır.

- **Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB Kestiriminde Robust Yöntemin Kullanılması**

Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB Kestirilmesinde Makine Öğrenmesi Algoritmalarının Kullanılması başlığı altında olduğu gibi Denklem (3.88) ve Denklem (3.100) bağıntılarında kestirilen uydu kayıklık ürünlerine, bu basamakta epok ortalaması kullanmak yerine Medyan Robust kestirici uygulanmıştır. Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB kestirim aşaması dışında SDBS modeline bağlı kalınmıştır.

4
UYGULAMA

Tez çalışması üç farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalarda PPP, PPP-AR ve RT-PPP tekniklerinde çözümler gerçekleştirilmiştir. Gerçek zamanlı PPP çözümleri için BNC (BKG Ntrip Client) yazılımı (Weber vd., 2016), ölçü sonrası çözümler için Net_Diff yazılımı (Yize, 2020) kullanılmıştır. Bununla birlikte kurulan hipotez kapsamında ölçü sonrası çözümler Python'da işlenmiştir. Böylece PPP-AR tekniğinin farklı modeller altında tamsayı belirsizliği yakınsama süresi ve PPP-AR tekniğinin farklı modellere göre konum doğruluğu test edilmiştir.

PPP-AR tekniğinde tamsayı belirsizliği yakınsama süresi için farklı servislerin sağlamış olduğu uydu kayıklıkları önemlidir. Yize Zhang tarafından geliştirilen Net_Diff yazılımı ile WUHAN, CODE, CNES, GRG ve JAXA servislerinin küresel ağ istasyonlarından kestirilen FCB değerlerine ulaşılabilir (Yize, 2020). Beş farklı servis tarafından üretilen uydu FCB ürünleri faz sinyalleri yönünden farklılaşır. Net_Diff yazılımında farklı servislerin sağlamış olduğu kombine faz sinyallerine ait kayıklıklar Tablo 4.1'de verilmiştir.

WUHAN, CODE, CNES ve GRG servisleri tarafından L_1C, L_1W, L_2C, L_2L, L_2S, L_2W, L_2X ve L_5I kombine sinyallerine ait kayıklıklar üretilir. Ancak JAXA servisine ait kayıklık dosyasında sadece L_1, L_2 ve L_5 faz sinyallerine ait kayıklıklar üretilmektedir. FCB değerlerinin varlığının yakınsama süresini doğrudan etkilediği bilinmektedir. Servislerin sağladığı sinyallere göre de yakınsama sürelerinin farklılaşması kaçınılmazdır. Wuhan Üniversitesi katkılarıyla geliştirilen WUHAN servisi GPS, Galileo, BeiDou ve QZSS uydularına ait kayıklıkları, Bern Üniversitesi katkılarıyla geliştirilen CODE servisi GPS ve Galileo uydularına ait kayıklıkları, CNES/CLS analiz merkezi tarafından geliştirilen CNES servisi GPS, Galileo ve BeiDou uydularına ait kayıklıkları, Groupe de Recherche en Geodesie Spatiale analiz merkezi tarafından geliştirilen GRG servisi GPS, Galileo uydularına ait kayıklıkları ve JAXA servisi ise GPS ve QZSS uydularına ait kayıklıkları sağlamaktadır (Geng vd., 2022). Söz konusu servislerin hepsi GPS uydularına ait kayıklıkları yayınlarken, hiçbiri GLONASS uydularına ait kayıklık bilgilerini yayınlamamaktadır.

Tablo 4.1 WUHAN, CODE, CNES, GRG ve JAXA için kombine faz sinyal kayıklıkları

Tanım	GPS Faz Sinyal Kayıklıkları				
	WUHAN	**CODE**	**CNES**	**GRG**	**JAXA**
GPS Taşıyıcı Faz L_1 ve kod C/A	L_1C	L_1C	L_1C	L_1C	L_1
GPS Taşıyıcı Faz L_1 Z-tracking	L_1W	L_1W		L_1W	
GPS Taşıyıcı Faz L_2 ve kod C/A		L_2C		L_2C	L_2
GPS Taşıyıcı Faz L_2 L_2C(L)	L_2L				
GPS Taşıyıcı Faz L_2 ve L_2C(M)	L_2S				
GPS Taşıyıcı Faz L_2Z-tracking	L_2W	L_2W	L_2W	L_2W	
GPS Taşıyıcı Faz L_2ve L_2C (M+L)	L_2X				
GPS Taşıyıcı Faz L_5 ve I.			L_5I		L_5

Ölçüm sonrası çözümlerin yanında RT-PPP tekniğinde de santimetre mertebesinde konum elde edebilmek için ihtiyaç duyulan yakınsama süresi tamsayı belirsizliğinin konusudur. Bu teknikte yakınsama süresinin kısalması için SSR (State Space Representation) mesajları kullanılır. Bu SSR mesajları uydu yörünge saat kombine ürünleri içerisinde RTCM, SSRZ (SSR Compressed Format) ve SPARTN (Safe Positionin Augmentation for Real Time Navigation) gibi farklı veri formatlarında alıcılara ulaştırılabilir. RTCM mesajları gerçek zamanlı uygulamalarda faz kayıklıkları için önerilen formattır (Karlitepe, vd., 2020). Bu yüzden bu çalışmada RTCM mesajları tercih edilmiştir. RTCM-SSR (Radio Technical Commission for Maritime Services-State Space Representation) mesajları hem yörünge saat bilgisi hem de faz kayıklıkları yardımıyla konum doğruluğuna ve yakınsama süresine katkı sağlamaktadır. RT-PPP tekniği ölçümlerinde BNC yazılımı üzerinden yörünge saat

ürünü olarak SSRC00BKG0 tercih edilmiştir. Yörünge ve saat ürünü tercih edilirken sağlamış olduğu RTCM/SSR mesajları dikkate alınmıştır. Düzeltme ürünleri konum doğruluğu ve yakınsama süresinin belirlenmesi yönünden gerçek zamanlı konum belirleme için oldukça önemlidir.

Tablo 4.2 RT-PPP tekniğinde kullanılan yörünge ve saat düzeltmesinin sağlamış olduğu SSR mesajlar (IGS, 2022)

SSRA00BKG0	**Tanım**
1057	SSR GPS Yörünge Düzeltmesi
1058	SSR GPS Saat Düzeltmesi
1059	SSR GPS CODE Kayıklık
1063	SSR GLONASS Yörünge Düzeltmesi
1064	SSR GLONASS Saat Düzeltmesi
1065	SSR GLONASS CODE Kayıklık
1240	SSR GALILEO Yörünge Düzeltmesi
1241	SSR GALILEO Saat Düzeltmesi
1242	SSR GALILEO CODE Kayıklık
1248	SSR SBAS CODE Kayıklık
1260	SSR BDS CODE Kayıklık
1265	SSR GPS Faz Kayıklık
1266	SSR GLONASS Faz Kayıklık
1267	SSR GALILEO Faz Kayıklık

Tablo 4.2 RT-PPP tekniğinde kullanılan yörünge ve saat düzeltmesinin sağlamış olduğu SSR mesajlar (devamı)

1268	SSR SBAS Faz Kayıklık
1269	SSR QZSS Faz Kayıklık
1270	SSR BDS Faz Kayıklık

Tamsayı belirsizliğinin yakınsama süresini belirleyen önemli kriteri uydu ve alıcıların kayıklıklarıdır. RTCM/SSR mesajlarından 1265 ile GPS faz kayıklık düzeltmesi, 1266 ile GLONASS faz kayıklık düzeltmesi, 1267 ile Galileo faz kayıklık düzeltmesi, 1268 SBAS faz kayıklık düzeltmesi, 1269 QZSS faz kayıklık ve 1270 BeiDou faz kayıklık düzeltmesi yayınlanmaktadır. Kayıklık düzeltmeleri gerçek zamanlı ölçülerde yakınsama süresini doğrudan etkiler (RTCM SC-104 SSR Working Group ve IGS Real-Time Working Group, 2020).

4.1 PPP-AR Tekniği ile FCB Sağlayıcı Servislerinin Yakınsama Sürelerinin Araştırılması

Geleneksel PPP sivil ve bilimsel araştırma amaçlı uygulamalarda yoğun olarak kullanılmaktadır. Ancak geleneksel PPP tekniğinde FCB ürünlerinin tamsayı belirsizliği içerisinde kaybolmasına bağlı olarak yakınsama süresine ihtiyaç duyulması bu tekniğin eksik yönüdür. PPP-AR tekniğinde ise FCB değerlerinin SDBS, DCM ve PCM gibi matematiksel modeller kullanılarak kestirilmeye çalışılması tamsayı belirsizliği çözümünde kritik öneme sahiptir. Söz konusu matematiksel modeller kullanılarak bazı kuruluşlar FCB kestirimi gerçekleştirerek kullanıcılara yayınlamaktadır. Net_Diff yazılımı ile kuruluşların üretmiş olduğu FCB ürünlerine ulaşılabilir.

Bu uygulamada WUHAN, CODE, CNES ve JAXA servisleri tarafından yayınlanan FCB ürünleri Net_Diff v1.14 yazılımında değerlendirilerek PPP-AR tekniği ve PPP tekniği yakınsama süreleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma yapılırken kullanılan Net_Diff v1.14 yazılımında PPP ve PPP-AR çözümlerine ait parametreler Tablo 4.3'de gösterilmiştir.

Tablo 4.3 Net_Diff v1.14 yazılımında PPP ve PPP-AR ölçüleri yapılırken seçilen parametreler (Yize, 2020)

Ayarlar	**Parametreler**
EOP parametreleri	EOP (IERS) 08 C04
Anten Dosyası	IGS14.atx
Okyanus Yüklemesi Modeli	FES2004
Aylık Kod GPS P1-C1 DCB Çözümü	P1C1wwww.DCB
Gözlem Dosyası-Aralığı	RNX-30 s
Uydu Frekansları	GPS: L_1-L_2, GLONASS L_1-L_2
Kod ve Faz ölçü ağırlığı	Kod: 0.3 m-Faz: 0.003 m (Yükseliğe Dayalı)
Process Mode - AR Mode	PPP-AR-Continuous
Başarı Oranı (Success Rate)	0.68
Faz Sıçraması Belirlenmesi	GF (Geometry Free) + MW (Melbourne-Wübbena)
Uydu yükseklik Açısı	10
Maks. PDOP Değeri	20
Troposfer Model	VMF1 (Vienna Mapping Functions 1)- GPT2_5w.grd
İyonosfer Model	codgDOY0.YYi:
Hassas Uydu/Saat Ürünleri	gbm.sp3-clk, whp.sp3-clk, cod.sp3.clk, jxf.sp3-clk
Multi-GNSS uydular için faz kayıklıkları (FCB)	CNES: gbm.bia, WUHAN: wum.bia, CODE:cod.bia, JAXA:jxf.fcb

Bu uygulamada 40 IGS istasyonunun 2022 yılına ait 54., 55., 56., 57., 58., 59., 60., 61., 62. ve 63. günlerinde 24 saatlik GPS-GLONASS gözlemleri PPP ve PPP-AR (WUHAN, CODE, CNES, JAXA) tekniklerinde değerlendirilmiştir. Servislerin tamsayı belirsizliği çözümünde farklı matematiksel modeller kullanması, PPP-AR tekniğinin farklı fraksiyonu olarak isimlendirilebilir. Tablo 4.4'de Net_Diff v1.14 yazılımında çözüm yapılan 40 IGS istasyonunun yaklaşık koordinatları ve anten bilgileri gösterilmiştir. Şekil 4.2'de IGS istasyonlarının dünya üzerindeki konumları paylaşılmıştır.

Tablo 4.4 Çözüm yapılan istasyonlara ait anten tipi, alıcı tipi ve yaklaşık koordinatlar

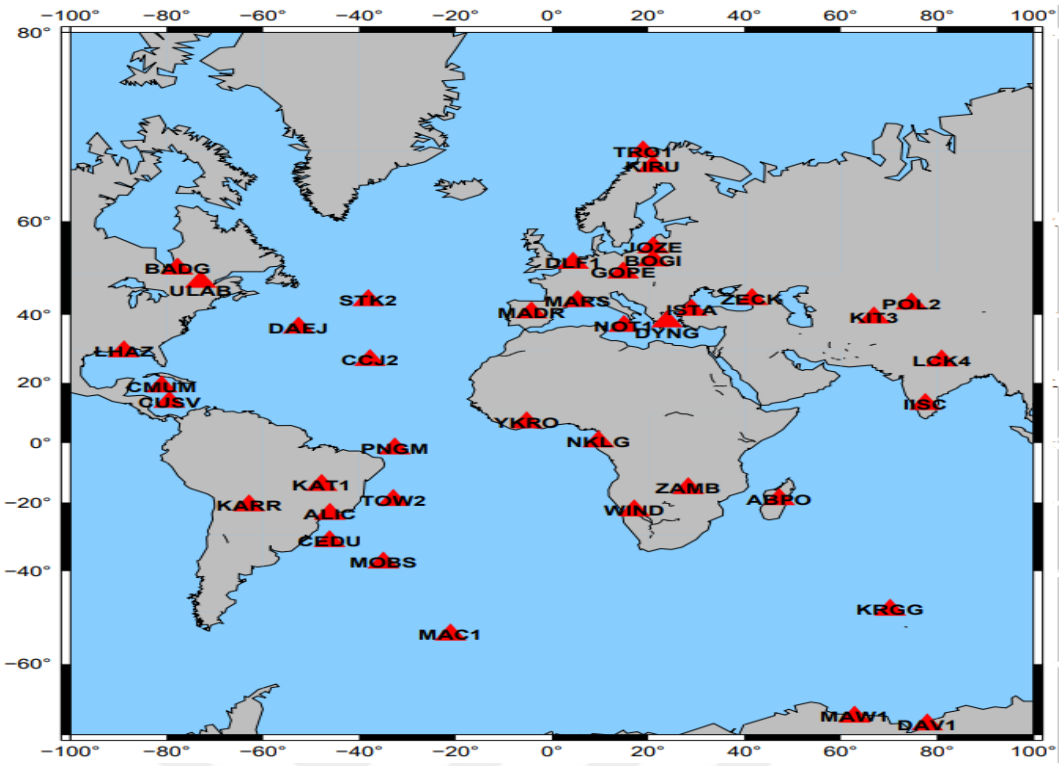
İstasyon	Enlem (°)	Boylam (°)	Anten Tipi	Alıcı Tipi
ABPO	-19.02512	47.22921	ASH701945G_M SCIT	SEPT POLARX5
ALIC	-23.68306	-46.11448	LEIAR25.R3 NONE	SEPT POLARX5
BADG	51.88465	-77.76501	JAVRINGANT_DM JVDM	JAVAD TRE_3 DELTA
BOGI	52.59401	21.03522	TPSCR.G5 TPSH	JAVAD TRE_G3T
CCJ2	27.08665	-37.80498	TRM59800.00 SCIS	TRIMBLE ALLOY
CEDU	-31.89718	-46.19016	AOAD/M_T NONE	SEPT POLARX5
CMUM	18.76743	-81.06762	JAV_GRANT-G3T NONE	TRIMBLE NETR9
CUSV	13.73852	-79.46608	JAVRINGANT_DM NONE	JAVAD TRE_3
DAEJ	36.44385	-52.62551	TRM59800.00 SCIS	TRIMBLE NETR9
DAV1	-68.80376	77.97261	LEIAR25.R3 LEIT	SEPT POLARX5
DLF1	52.10222	4.38746	LEIAR25.R3 LEIT	TRIMBLE NETR9

Tablo 4.4 Çözüm yapılan istasyonlara ai anten tipi alıcı tipi ve yaklaşık koordinatlar (devamı)

DYNG	38.12892	23.93244	TRM59800.00 NONE	SEPT POLARX5
GOPE	50.01828	14.78563	TPSCR.G3 TPSH	TRIMBLE ALLOY
IISC	13.02339	77.57038	ASH701945E_M NONE	SEPT POLARX5
ISTA	41.16665	29.01935	LEIAR25.R4 LEIT	LEICA GR25
JOZE	52.21411	21.03154	SEPCHOKE_B3E6 NONE	SEPT POLARX5
KARR	-20.99052	-62.90280	TRM59800.00 NONE	SEPT POLARX5
KAT1	-14.37897	-47.84672	LEIAR25.R3 LEIT	SEPT POLARX5
KIRU	68.07855	20.96845	SEPCHOKE_B3E6 SPKE	SEPT POLARX5
KIT3	39.18910	66.88545	SEPCHOKE_B3E6 NONE	SEPT ASTERX4
KRGG	-49.45308	70.25551	LEIAR25.R4 LEIT	TRIMBLE ALLOY
LCK4	26.93095	80.95562	LEIAR25.R3 LEIT	TRIMBLE ALLOY
LHAZ	29.68218	-88.89597	LEIAR25.R4 LEIT	LEICA GR25
MAC1	-54.63057	-21.06417	JAVRINGANT_DM SCIS	SEPT POLARX5
MADR	40.48859	-4.24966	AOAD/M_T NONE	JAVAD TRE_G3TH
MARS	43.35034	5.35379	TRM57971.00 NONE	LEICA GR50
MAW1	-67.82414	62.87071	AOAD/M_T AUST	SEPT POLARX5
MOBS	-37.87887	-35.02466	JAVRINGANT_DM NONE	SEPT POLARX5

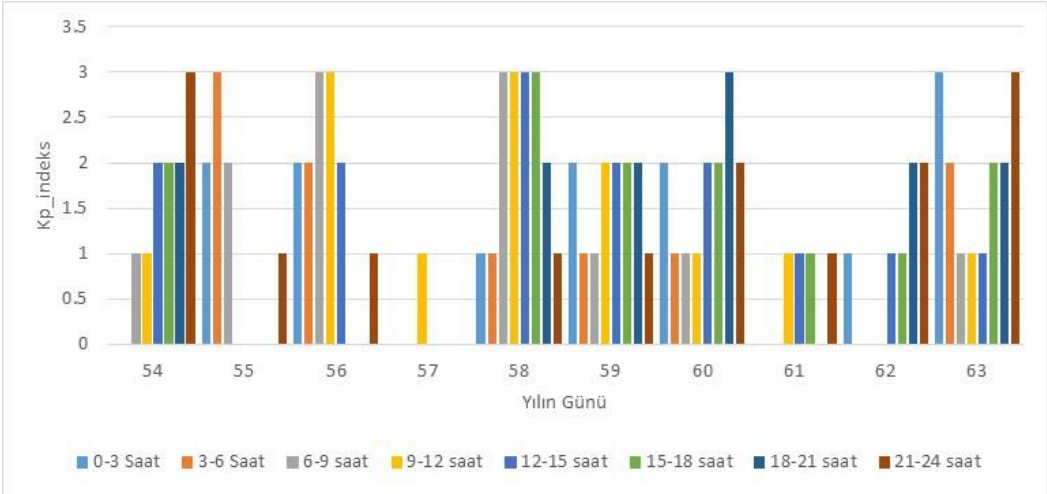
Tablo 4.4 Çözüm yapılan istasyonlara ait anten tipi, alıcı tipi ve yaklaşık koordinatlar (devamı)

NKLG	0.35391	9.67213	TRM59800.00 SCIS	SEPT POLARX5
NOT1	36.92192	14.98979	LEIAR20 NONE	LEICA GR30
PNGM	-2.04324	-32.63400	TRM59800.00 NONE	TRIMBLE NETR9
POL2	42.74867	74.69427	TPSCR.G3 NONE	JAVAD TRE_3
STK2	43.60133	-38.15518	TRM59800.00 SCIS	TRIMBLE ALLOY
TOW2	-19.27636	-32.94431	LEIAR25.R3 NONE	SEPT POLARX5
TRO1	69.89706	18.93965	TRM59800.00 SCIS	TRIMBLE NETR9
ULAB	47.95874	-72.94767	AVRINGANT_G5T NONE	JAVAD TRE_3
WIND	-22.58619	17.08944	JAVRINGANT_G5T NONE	JAVAD TRE_3
YKRO	6.87089	-5.24009	ASH701945C_M NONE	JAVAD TRE_3
ZAMB	-15.42921	28.31102	AOAD/M_T NONE	JAVAD TRE_3
ZECK	43.86225	41.56507	JAVRINGANT_DM JVDM	JAVAD TRE_3



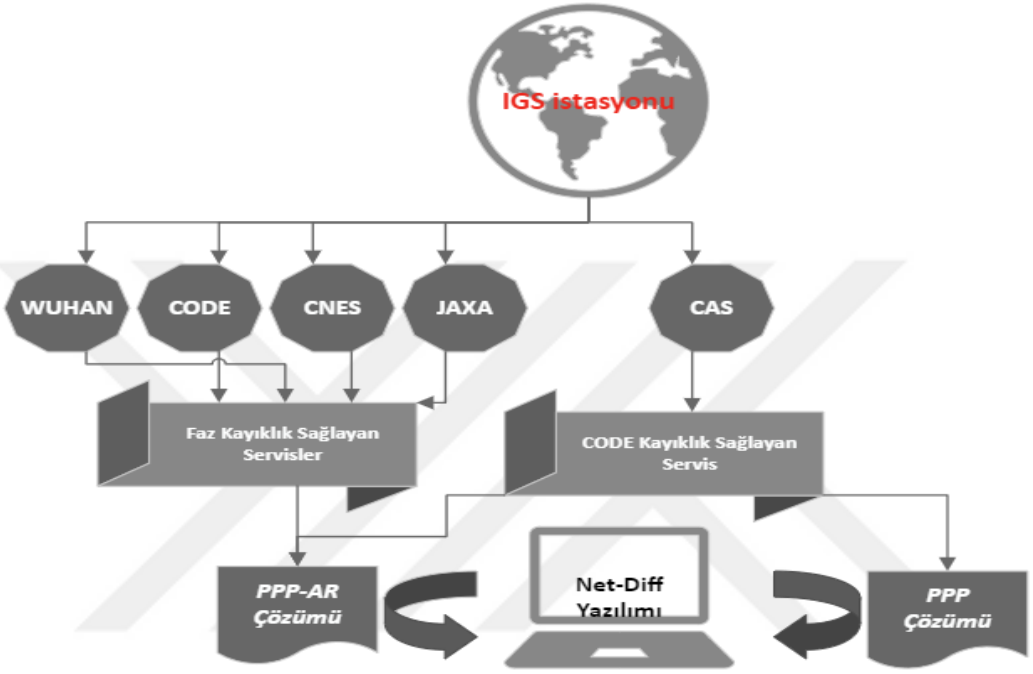
Şekil 4.2 Çözüm yapılan IGS istasyonları

Atmosferde, güneş yüzeyinde olan patlamalara bağlı olarak manyetik etkiler ortaya çıkmaktadır. Bu manyetik aktiviteler Alman araştırma merkezi GFZ tarafından günlük 3'er saatlik periyotlarda Kp_indeks değeri olarak yayınlanır. Kp_indeksi 0 ile 9 arasında değişir; burada 0 değeri çok az ve 9 değeri aşırı jeomanyetik aktivite olduğu anlamına gelmektedir. Bu uygulamada çözüm yapılan istasyonların atmosferdeki manyetik etkilerden az etkilendiği günler seçilmiştir.



Şekil 4.3 Çalışma günlerine ait Kp-Indeks değerleri

Çalışma günlerine ait Kp_indeks değerleri Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere Kp_indeks değerleri 4'ün altındadır. Dolayısıyla manyetik aktivitelerin konum hassasiyetine etkisi oldukça düşüktür ve bu doğrultuda yakınsama süresini de etkilemeyeceği düşünülmektedir. Net_Diff yazılımı ile PPP ve PPP-AR tekniklerinde tamsayı belirsizliği çözümü iş akışı Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4 Net_Diff yazılımı ile PPP ve PPP-AR tekniklerinde tamsayı belirsizliği çözüm şeması

40 IGS istasyonuna ait PPP ve PPP-AR çözümlerinden Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları üretilmiştir. Referans koordinatlar IGS haftalık çözüm koordinatlarından elde edilmiştir. Referans kabul edilen istasyon koordinatları ile ölçüm koordinatları arasında fark alınarak Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat fark değerleri üretilmiştir. Buna göre hesaplanan koordinat fark değerleri 0.05 m ve 0.01 m hassasiyetlere ulaştığında yakınsadığı kabul edilmiştir. Seçilen IGS istasyonlarında ölçümlerin kaçıncı epokta yakınsadığı tespit edilmiş ve 10 günlük ortalaması alınmıştır. 40 IGS istasyon gözleminin kaçıncı epokta yakınsadığı 10 günlük ortalama Kuzey, Doğu, Yukarı fark değerleri ve standart sapmaları Tablo 4.5, Tablo 4.6 ve Tablo 4.7'de gösterilmiştir. Her bir istasyon için en az yakınsama süresine sahip servisler kalın punto ile gösterilmiştir.

Tablo 4.5 İstasyonların Kuzey koordinatlarına ait ortalama yakınsama epokları ve standart sapmaları

İstasyon	WUHAN	CODE	CNES	JAXA	PPP
ABPO	44 ±14	***41*** ±20	98 ±112	70 ±39	175 ±110
ALIC	***48*** ±13	61 ±46	98 ±65	139 ±167	594 ±640
BADG	***53*** ±20	56 ±17	108 ±51	89 ±32	350 ±284
BOGI	***28*** ±10	44 ±37	74 ±50	78 ±70	308 ±246
CCJ2	***135*** ±203	142 ±191	196 ±171	178 ±157	864 ±626
CEDU	***52*** ±18	78 ±33	90 ±49	136 ±65	636 ±594
CMUM	***71*** ±30	79 ±42	186 ±126	181 ±135	688 ±533
CUSV	***50*** ±30	61 ±34	125 ±20	189 ±42	842 ±989
DAEJ	***63*** ±53	94 ±99	208 ±168	173 ±120	1222 ±838
DAV1	***90*** ±69	101 ±86	236 ±245	223 ±193	904 ±620
DLF1	***24*** ±9	41 ±34	93 ±50	158 ±87	198 ±86
DYNG	***32*** ±20	46 ±31	68 ±27	78 ±67	167 ±120
GOPE	***42*** ±13	51 ±20	112 ±82	121 ±66	315 ±257
IISC	***38*** ±8	44 ±8	64 ±33	106 ±31	114 ±58
ISTA	***45*** ±13	55 ±24	108 ±60	117 ±70	349 ±294
JOZE	***48*** ±12	57 ±30	108 ±106	87 ±52	193 ±190
KARR	***49*** ±16	75 ±37	88 ±42	86 ±26	756 ±692

Tablo 4.5 İstasyonların Kuzey koordinatlarına ait ortalama yakınsama epokları ve standart sapmaları (devamı)

KAT1	***66*** ±24	85 ±44	117 ±114	156 ±91	665 ±730
KIRU	***101*** ±158	108 ±138	131 ±137	172 ±139	266 ±154
KIT3	44 ±14	***42*** ±11	62 ±24	81 ±61	129 ±127
KRGG	***79*** ±22	***79*** ±32	102 ±28	149 ±56	365 ±289
LCK4	***37*** ±9	41 ±9	55 ±6	61 ±27	146 ±95
LHAZ	***73*** ±25	82 ±29	144 ±60	216 ±89	703 ±432
MAC1	***60*** ±21	73 ±24	194 ±260	197 ±144	1011 ±749
MADR	***78*** ±25	86 ±25	191 ±85	122 ±52	290 ±160
MARS	***75*** ±20	111 ±67	137 ±64	129 ±94	219 ±179
MAW1	226 ±316	***197*** ±243	230 ±224	322 ±324	917 ±692
MOBS	***120*** ±176	233 ±370	286 ±509	304 ±326	1297 ±686
NKLG	***68*** ±63	84 ±91	***68*** ±42	97 ±71	167 ±90
NOT1	***34*** ±27	63 ±86	141 ±114	127 ±84	191 ±180
PNGM	***87*** ±73	79 ±73	148 ±132	146 ±111	694 ±709
POL2	***53*** ±20	69 ±30	59 ±19	103 ±76	153 ±88
STK2	***185*** ±274	285 ±552	600 ±807	266 ±317	1401 ±908
TOW2	***43*** ±16	57 ±31	173 ±87	163 ±87	531 ±452
TRO1	***48*** ±53	51 ±42	90 ±67	103 ±34	261 ±140

Tablo 4.5 İstasyonların Kuzey koordinatlarına ait ortalama yakınsama epokları ve standart sapmaları (devamı)

ULAB	***100*** ±24	128 ±48	161 ±45	143 ±43	755 ±828
WIND	***58*** ±25	88 ±53	164 ±110	211 ±187	749 ±643
YKRO	***37*** ±20	38 ±17	74 ±37	103 ±78	199 ±181
ZAMB	***42*** ±23	70 ±42	123 ±102	126 ±55	185 ±95
ZECK	***52*** ±11	77 ±39	101 ±51	105 ±42	207 ±157
Ortalama Epok	***67***	**90**	**140**	**145**	**529**

Tablo 4.6 İstasyonların Doğu koordinatlarına ait ortalama yakınsama epokları ve standart sapmaları

İstasyon	**WUHAN**	**CODE**	**CNES**	**JAXA**	**PPP**
ABPO	***42*** ±14	87 ±99	119 ±114	172 ±113	354 ±331
ALIC	***39*** ±9	142 ±215	49 ±58	103 ±57	409 ±443
BADG	***65*** ±26	79 ±34	128 ±63	121 ±54	211 ±230
BOGI	***32*** ±15	78 ±125	101 ±100	112 ±81	376 ±662
CCJ2	61 ±25	***57*** ±46	179 ±80	131 ±93	492 ±832
CEDU	***40*** ±14	102 ±124	42 ±19	95 ±49	369 ±527
CMUM	***99*** ±35	174 ±104	194 ±158	303 ±161	305 ±339
CUSV	***49*** ±49	67 ±67	78 ±78	411 ±411	338 ±338
DAEJ	***39*** ±18	48 ±34	196 ±81	183 ±163	233 ±344

Tablo 4.6 İstasyonların Doğu koordinatlarına ait ortalama yakınsama epokları ve standart sapmaları (devamı)

DAV1	***110*** ±102	134 ±128	114 ±131	197 ±189	288 ±337
DLF1	***24*** ±12	60 ±86	183 ±231	165 ±115	294 ±307
DYNG	***29*** ±21	42 ±29	95 ±90	120 ±95	120 ±100
GOPE	53 ±34	***46*** ±18	120 ±96	123 ±78	178 ±154
IISC	***39*** ±15	76 ±53	79 ±91	126 ±55	268 ±233
ISTA	***44*** ±8	96 ±82	191 ±116	139 ±51	304 ±551
JOZE	102 ±110	***97*** ±104	258 ±286	173 ±79	206 ±178
KARR	***137*** ±308	204 ±331	329 ±652	397 ±858	456 ±592
KAT1	215 ±502	381 ±516	***162*** ±329	370 ±547	498 ±489
KIRU	***100*** ±159	118 ±163	126 ±142	197 ±137	199 ±262
KIT3	***118*** ±200	126 ±209	226 ±326	183 ±245	414 ±503
KRGG	176 ±242	***167*** ±244	216 ±224	182 ±155	472 ±596
LCK4	***34*** ±9	82 ±96	57 ±22	107 ±133	394 ±574
LHAZ	***60*** ±14	139 ±135	169 ±161	252 ±127	330 ±385
MAC1	45 ±19	62 ±31	***36*** ±9	117 ±65	351 ±357
MADR	***89*** ±39	111 ±47	246 ±84	222 ±181	292 ±144
MARS	***84*** ±18	149 ±97	353 ±223	384 ±279	643 ±601
MAW1	276 ±306	***247*** ±243	284 ±272	427 ±426	463 ±275

Tablo 4.6 İstasyonların Doğu koordinatlarına ait ortalama yakınsama epokları ve standart sapmaları (devamı)

MOBS	40 ±11	117 ±144	***39*** ±12	133 ±60	288 ±203
NKLG	***126*** ±207	149 ±211	226 ±205	235 ±229	367 ±223
NOT1	***28*** ±25	62 ±66	190 ±153	133 ±67	380 ±834
PNGM	***114*** ±30	127 ±40	175 ±129	187 ±101	505 ±662
POL2	64 ±10	89 ±20	***58*** ±16	160 ±65	442 ±396
STK2	***42*** ±26	69 ±46	177 ±36	169 ±67	167 ±73
TOW2	***27*** ±14	43 ±20	39 ±20	112 ±80	481 ±480
TRO1	***76*** ±141	86 ±167	153 ±216	207 ±199	264 ±253
ULAB	***101*** ±23	141 ±79	201 ±184	179 ±53	299 ±335
WIND	***107*** ±120	179 ±239	217 ±117	301 ±290	280 ±287
YKRO	***43*** ±27	88 ±111	294 ±174	339 ±335	530 ±682
ZAMB	***80*** ±81	129 ±107	223 ±123	312 ±247	538 ±675
ZECK	***52*** ±11	106 ±78	116 ±100	167 ±99	295 ±255
Ortalama Epok	***78***	**114**	**161**	**204**	**352**

Tablo 4.7 İstasyonların Yukarı koordinatlarına ait ortalama yakınsama epokları ve standart sapmaları

İstasyon	WUHAN	CODE	CNES	JAXA	PPP
ABPO	45 ±11	***44*** ±10	174 ±95	160 ±72	514 ±546
ALIC	***43*** ±10	49 ±16	55 ±18	95 ±34	367 ±215
BADG	***43*** ±14	46 ±13	91 ±60	59 ±20	172 ±70
BOGI	***40*** ±11	53 ±23	269 ±139	176 ±44	939 ±768
CCJ2	46 ±15	***36*** ±15	143 ±150	110 ±105	218 ±169
CEDU	***50*** ±37	74 ±33	103 ±130	157 ±164	354 ±349
CMUM	***111*** ±90	113 ±86	181 ±103	191 ±134	319 ±230
CUSV	***49*** ±49	81 ±81	140 ±140	123 ±123	175 ±175
DAEJ	***42*** ±16	44 ±11	90 ±33	78 ±35	145 ±50
DAV1	***144*** ±181	175 ±189	243 ±154	272 ±135	774 ±602
DLF1	***43*** ±42	66 ±66	282 ±218	166 ±67	354 ±167
DYNG	***47*** ±46	110 ±99	477 ±638	528 ±650	948 ±821
GOPE	308 ±605	***94*** ±78	623 ±740	435 ±562	1518 ±779
IISC	***44*** ±19	73 ±56	521 ±577	230 ±241	1404 ±672
ISTA	***59*** ±36	83 ±50	265 ±139	229 ±122	521 ±530
JOZE	51 ±9	***47*** ±22	251 ±111	230 ±113	379 ±151
KARR	***41*** ±9	57 ±33	122 ±125	104 ±114	782 ±596

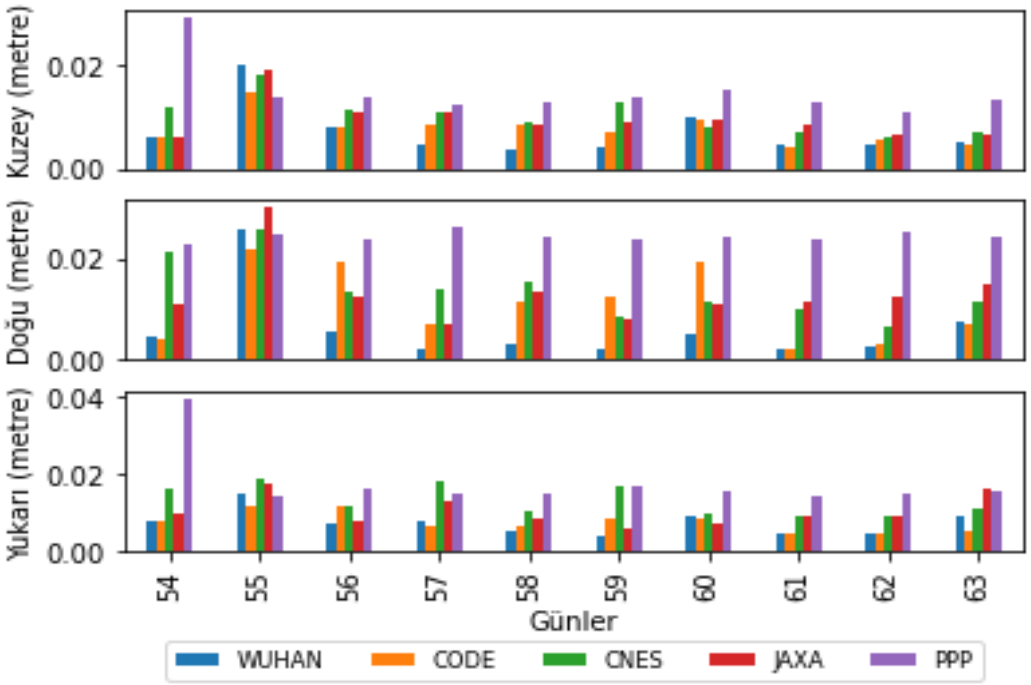
Tablo 4.7 İstasyonların Yukarı koordinatlarına ait ortalama yakınsama epokları ve standart sapmaları (devamı)

KAT1	***61*** ±24	89 ±51	166 ±221	134 ±69	514 ±420
KIRU	***98*** ±136	100 ±115	288 ±216	279 ±210	667 ±529
KIT3	***56*** ±19	79 ±77	165 ±82	164 ±79	600 ±522
KRGG	82 ±24	***78*** ±40	227 ±207	253 ±212	495 ±569
LCK4	***49*** ±21	62 ±41	166 ±141	116 ±52	332 ±308
LHAZ	***69*** ±22	116 ±99	217 ±146	176 ±101	545 ±333
MAC1	***52*** ±21	78 ±87	165 ±166	162 ±178	458 ±248
MADR	***96*** ±95	210 ±173	245 ±114	237 ±166	522 ±294
MARS	***89*** ±43	217 ±88	311 ±166	392 ±208	437 ±216
MAW1	***138*** ±206	158 ±196	249 ±243	212 ±232	746 ±616
MOBS	***41*** ±13	65 ±37	85 ±47	133 ±45	241 ±94
NKLG	***61*** ±34	81 ±27	493 ±582	214 ±93	1117 ±691
NOT1	***70*** ±45	103 ±91	261 ±76	217 ±76	629 ±511
PNGM	***150*** ±126	151 ±58	468 ±300	345 ±187	712 ±679
POL2	***63*** ±18	107 ±115	427 ±578	149 ±99	1675 ±689
STK2	***38*** ±16	44 ±13	100 ±32	75 ±42	245 ±235
TOW2	***64*** ±62	84 ±68	132 ±98	118 ±54	499 ±554
TRO1	***122*** ±193	138 ±263	293 ±266	251 ±215	811 ±698

Tablo 4.7 İstasyonların Yukarı koordinatlarına ait ortalama yakınsama epokları ve standart sapmaları (devamı)

ULAB	61 ±20	***57*** ±20	124 ±62	102 ±50	398 ±375
WIND	***83*** ±51	130 ±99	248 ±359	254 ±354	608 ±630
YKRO	***110*** ±122	216 ±150	488 ±583	297 ±193	1170 ±879
ZAMB	***104*** ±62	126 ±82	192 ±86	240 ±59	464 ±224
ZECK	***80*** ±54	103 ±67	210 ±114	176 ±67	344 ±126
Ortalama Epok	***76***	**96**	**244**	**198**	**603**

Tablo 4.5, Tablo 4.6 ve Tablo 4.7'de istasyonların ortalama yakınsama epokları hesaplanmıştır. Buna göre Kuzey için WUHAN ortalama 67. epokta, CODE ortalama 90. epokta, CNES ortalama 140. epokta, JAXA ortalama 145. epokta ve PPP ortalama 529. epokta yakınsamıştır. Doğu için WUHAN ortalama 78. epokta, CODE ortalama 114. epokta, CNES ortalama 161. epokta, JAXA ortalama 204. epokta ve PPP ortalama 352. epokta yakınsamıştır. Yukarı için WUHAN ortalama 76. epokta, CODE ortalama 96. epokta, CNES ortalama 244. epokta, JAXA ortalama 198. epokta ve PPP ortalama 603. epokta yakınsamıştır. Bu ortalama yakınsama süreleri kullanılarak farklı günlerin yakınsadıktan sonraki standart sapmaları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Böylece 40 IGS istasyonunun farklı servislerde yakınsama süreleri başarısı ortalama değer üzerinden gösterilmiştir. Farklı servislerin yakınsadıktan sonraki başarısı standart sapma üzerinden gösterilmiştir. Bununla birlikte Tablo 4.8'de 40 IGS istasyonu için servislerin ilk 300 epok verileri kullanılarak PPP-AR servislerinin ortalama değer üzerinden PPP'ye göre başarısı gösterilmiştir. Bu değerlere göre PPP-AR servislerinin Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları sırasıyla WUHAN 0.007 m, 0.006 m, 0.007 m, CODE 0.009 m, 0.011 m, 0.008 m, CNES 0.011 m, 0.014 m, 0.013 m, JAXA 0.011 m, 0.013 m, 0.010 m. Bununla birlikte PPP ise 0.015 m, 0.016 m, ve 0.017 m'dir.



Şekil 4.5 IGS istasyonlarının farklı servislerde 10 günlük standart sapma değerleri

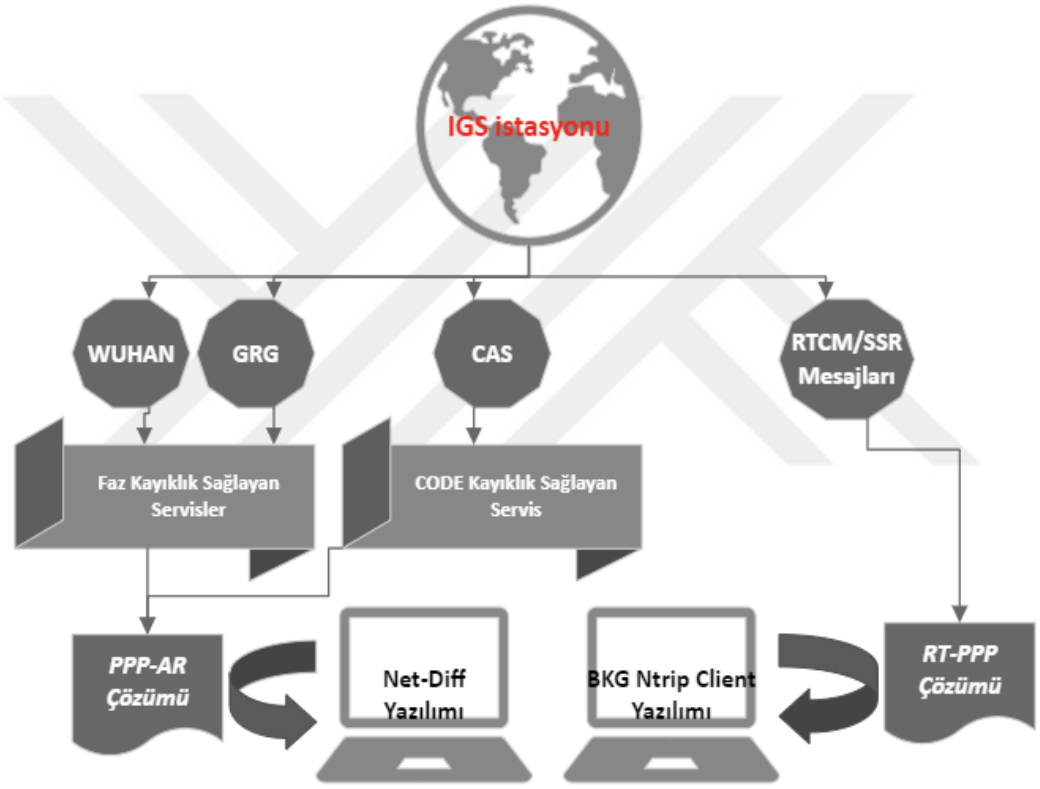
Tablo 4.8 IGS istasyonlarının 10 günlük Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat değerlerinin ortalaması

Service	WUHAN	CODE	CNES	JAXA	PPP
Kuzey	0.007 m	0.009 m	0.011 m	0.011 m	0.015 m
Doğu	0.006 m	0.011 m	0.014 m	0.013 m	0.016 m
Yukarı	0.007 m	0.008 m	0.013 m	0.010 m	0.017 m

4.2 PPP-AR ve RT-PPP Tekniklerinin Yakınsama Süresi Üzerinden İncelenmesi

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen bu uygulamada 29 Eylül 2022 tarihinde yerel saat ile 13:00-16:00 zaman aralığında DLF1 ve GOPE istasyonlarında GPS-GLONASS uyduları ile BNC v2.12.18 yazılımı üzerinden yörünge saat ürünü SSR00BKG0 seçilerek RT-PPP ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Seçilen yörünge saat ürünü tamsayı belirsizliği çözümü için gerekli olan FCB mesajlarını da içerdiği için oldukça önemlidir.

Net_Diff v1.14 yazılımı kullanılarak PPP-AR servislerinin karşılaştırıldığı bir önceki uygulamada sadece WUHAN, CODE, CNES ve JAXA servislerine ait uydu kayıklıklarını kullanabilmektedir. Net_Diff v1.15 yazılımı ile GRG servislerinin sağladığı uydu kayıklık değerleri de kullanılabilmektedir. Tez çalışmasının bu aşamasında Net_Diff v1.15 yazılımı kullanılarak 29 Eylül 2022 tarihinde yerel saat ile 13:00-16:00 zaman aralığında DLF1 ve GOPE istasyonlarında GRG ve WUHAN servislerinin üretmiş olduğu FCB ürünleri ile PPP-AR çözümleri gerçekleştirilmiştir. PPP-AR ve RT-PPP tekniklerinin tamsayı belirsizlik çözümleri iş akışı Şekil 4.6'de gösterilmiştir.



Şekil 4.6 PPP-AR ve RT-PPP tamsayı belirsizlik çözümlerinin karşılaştırma akış şeması

Bu kapsamda Tablo 4.9'da verilen alıcı sinyal kayıklıkları da dikkate alınarak PPP-AR tekniğinde GRG ve WUHAN servislerinin sağlamış olduğu kayıklıklar yakınsama süreleri ve konum doğrulukları Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları üzerinden karşılaştırılmıştır. Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatlarına ulaşabilmek için IGS'in haftalık istasyon koordinatları referans alınmıştır. Bu kapsamda PPP-AR/GRG ve PPP-AR/WUHAN yakınsama süresi başarılarının aynı olduğu görülmüştür.

Tablo 4.9 DLF1 ve GOPE alıcı kayıklıkları

Tanım	Alıcı Kayıklık	
	DLF1	**GOPE**
GPS Taşıyıcı Faz L_1 ve kod C/A	L_1C	L_1C
GPS Taşıyıcı Faz L_2 Z-tracking	L_2W	L_2W
GPS Taşıyıcı Faz L_2 ve L_2C (M+L)	L_2X	L_2X
GPS Taşıyıcı Faz L_5 I+Q	L_5X	L_5X

Ayrıca hesaplanan Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat fark değerlerine göre RT-PPP tekniğinin PPP-AR tekniğine göre yakınsama süresi ve konum doğrulukları incelenmiştir. Çalışma kapsamında yapılan analizlere göre WUHAN ve GRG servislerinde ilk 50 epok için 0.05 m yakınsama sağlanırken, gerçek zamanda kayıklık çözümü için 0.05 m yakınsama hassasiyetine ilk 2000 epoktan sonra ulaşılabilmiştir. Bununla birlikte her üç alternatif gözlem (RT-PPP, PPP-AR/GRG, PPP-AR/WUHAN) için tamsayı belirsizliği çözümü sağlandıktan sonra; RT-PPP için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatlarının standart sapma değerleri sırasıyla 0.211 m, 0.130 m, 0.252 m, PPP-AR/GRG için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatlarının standart sapma değerleri sırasıyla 0.004 m, 0.010 m, 0.007 m ve PPP-AR/WUHAN için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatlarının standart sapma değerleri sırasıyla 0.004 m, 0.009 m, 0.008 m olarak bulunmuştur. Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları hesaplanırken IGS'in haftalık istasyon koordinatları referans alınmıştır.

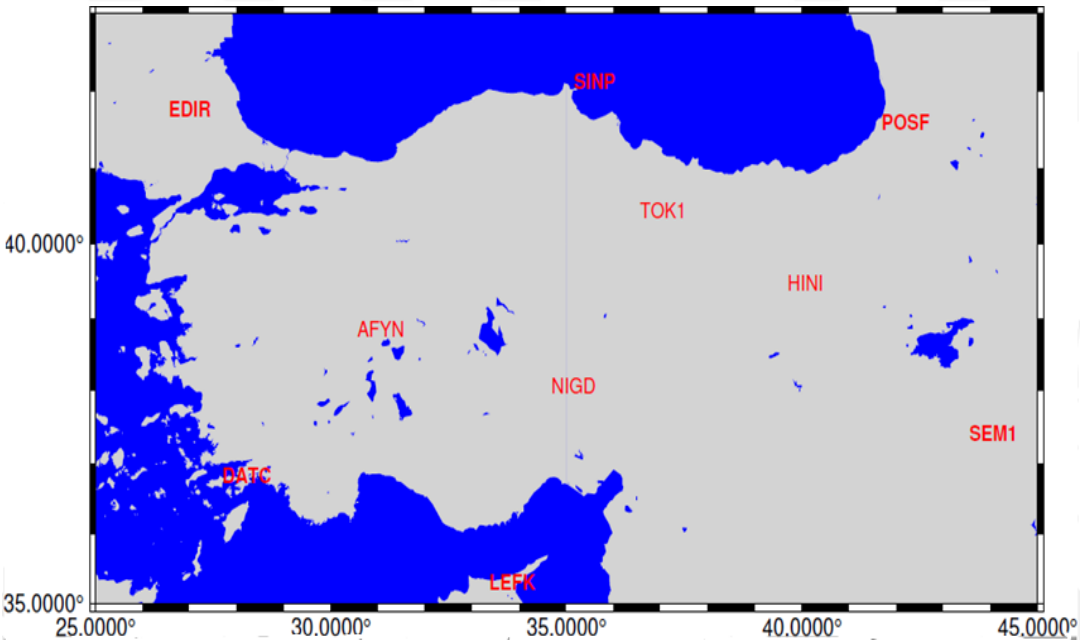
4.3 Makine Öğrenmesi Algoritmaları ile Güçlendirilmiş PPP-AR Çözüm Yaklaşımı

Tez çalışmasının bu aşamasında tamsayı belirsizliği çözümü için önerilen yenilikçi yaklaşım modelinden bahsedilecektir. Bu yenilikçi model ile farklı Wide-Lane ve Narrow-Lane FCB kestirim modelleri üzerinden PPP-AR tekniği başarısının

geliştirilmesi amaçlanmaktadır. TUSAGA-AKTIF ağından 10 nokta seçilerek simüle edilmiş GNSS ölçümleri hazırlanmış ve analizlerde kullanılmıştır.

4.3.1 Simülasyon Verisi

2022 yılının 2. – 8. günlerinde AFYN, DATC, EDIR, HINI, LEFK, NIGD, POSF, SEM1, SINP ve TOK1'den oluşan 10 adet TUSAGA-Aktif noktasının 30 saniye aralıklı 24 saatlik gözlem dosyaları kullanılmıştır. Şekil 4.7'de istasyonların konumları gösterilmiştir. İstasyonlardan DATC, EDIR, LEFK, SINP, POSF ve SEM1 ile Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB değerleri kestirilmesi için planlanmıştır. AFYN, HINI, NIGD ve TOK1 istasyonlarında hesaplanan Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB değerleri çözümlere eklenerek tamsayı belirsizliği irdelenmiştir. Gözlemlerde GPS uydularına ait L_1 ve L_2 faz ölçüleri, C_1 ve C_2 kod ölçüleri işlenmiştir. Bu gözlem verilerinde troposfer, iyonosfer gibi hata kaynaklarından arındırılmış simülasyon verisi kullanılmıştır. Gözlemlere sadece yörünge, saat ve rastgele hata değerleri eklenmiştir. Rastgele hataların kod ölçüleri için standart sapması 50 cm ve faz ölçüleri için 2 mm olacak şekilde normal dağılımlı olarak üretilmiştir. Simülasyon verisi ile FCB hatasının etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.7 TUSAGA-AKTİF İstasyonlarının harita üzerinde gösterimi

Şekil 4.7'de gösterilen TUSAGA-AKTİF istasyonlarında 24 saatlik gözlemler kullanılarak PPP ve PPP-AR çözümü gerçekleştirilmiştir. PPP ve PPP-AR

çözümlerinin analizleri Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları üzerinden incelenmiştir.

4.3.2 PPP Çözümü

3.1.1 başlığı altında IF kombinasyonu için bahsedilen matematiksel modeller ve 3.1.3.1 başlığı altında tamsayı belirsizliği çözümü için bahsedilen matematiksel modeller Python'da kodlanarak PPP çözümü gerçekleştirilmiştir. PPP çözümünde uydu ve alıcı FCB değerleri dikkate alınmaksızın tamsayı belirsizliği (N_{IF}) bilinmeyen olarak EKK çözümüne dahil edilmiştir. EKK çözümü için oluşturulan A katsayılar matrisi ve bilinmeyenler ait bağıntılar "IF Kombinasyonu ve En Küçük Kareler Çözümü" başlığı altında verilmiştir.

4.3.3 PPP-AR Çözümü

Bu uygulamada PPP tekniği çözümlerinin yanı sıra PPP-AR tekniği çözümleri de yapılmıştır. PPP-AR çözümleri Wide-Lane ve Narrow-Lane FCB kestirim modelleri yönünden birbirinden farklılaşır. Uygulamada kullanılan FCB kestiriminin matematiksel modelleri 3.1.3 başlığı altında detaylı olarak anlatılmıştır. Bu bölümde 6 farklı FCB kestirimi gerçekleştirilmiştir. Bunlardan bir tanesi literatürde bahsedilen SDBS modelidir. 4 tanesi makine öğrenme algoritmaları (RF, SVM, DTree ve KNN) kullanılarak kestirilmiştir. 1 tanesi de robust kestirici (Medyan) kullanılarak kestirilmiştir.

4.3.3.1 SDBS Modeli ile FCB kestirimi

Wide-Lane ve Narrow-Lane FCB kestirimi SDBS modeli kullanılarak DATC, EDIR, LEFK, SINP, POSF ve SEM1 istasyonlarında gerçekleştirilmiştir. Kestirilen FCB değerleri AFYN, HINI, NIGD ve TOK1 istasyonlarında matematiksel modele eklenerek PPP-AR/SDBS tekniği çözümü gerçekleştirilmiştir. PPP-AR/SDBS tekniğinde MW kombinasyonu ile Wide-Lane belirsizlik ve IF kod-faz kombinasyonu ile L_1 sinyaline ait belirsizlikleri sırasıyla çözülmüştür.

SDBS modeli ile PPP-AR çözümünde öncelikle Wide-Lane tamsayı bilinmeyeni (N_{WL}) kestirilir. Devamında L_1 tamsayı bilinmeyeni (N_1) kestirilir. Bu çözüm 3.1.3.3 başlığı altında detaylı anlatılmıştır. Wide-Lane tamsayı bilinmeyeni ve L_1 tamsayı bilinmeyeni bulunduktan sonra uydu alıcı arasındaki mesafeyi ifade eden matematiksel modele bilinen olarak eklenerek EKK çözümü gerçekleştirilir.

EKK çözümünde kullanılacak A katsayılar matrisi ve bilinmeyenler matrisi (4.1) bağıntısında gösterilmiştir. Normal denklem çözümü epok epok gerçekleştirilir. (3.35) bağıntısında gösterilen filtreleme işlemi burada da uygulanır. Böylece d_x, d_y, d_z koordinat bilinmeyenlerine ve $d\varsigma_{rec}$ alıcı saat bilinmeyenine ulaşılır. Bu çözüm ağda bulunan AFYN, HINI, NIGD ve TOK1 istasyonları için gerçekleştirilmiştir. Her istasyonun PPP ve PPP-AR çözümleri için hesaplanan koordinatlar ile gerçek koordinatlar arasındaki farkları elde edilmiştir. (Ek:1)

$$A = \begin{bmatrix} G^1 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 \\ G^2 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 \\ G^3 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ G^n \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 \\ G^1 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 \\ G^2 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 \\ G^3 \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ G^n \triangle_{xyz}(t(0)) & 1 \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \\ d\varsigma_{rec} \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

Ayrıca Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları üzerinden yakınsama süresi analizleri yapılmıştır. Hesaplanan Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları, referans koordinatlardan çıkartılarak metre mertebesi ve santimetre mertebesi doğruluk olarak iki farklı yakınsama kriterinde incelenmiştir.

Tablo 4.10 ve Tablo 4.11'de istasyonların metre mertebesi ve santimetre mertebesi doğrulukları kaçıncı epokta yakaladıkları gösterilmiştir. Tablolarda istasyonlar için verilmiş yakınsama epok sayıları 7 günlük ortalama değerleridir. Ayrıca istasyonların koordinatlarının ortalaması alınarak metre mertebesi doğruluk için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat fark değerleri sırasıyla PPP'de 215., 94.75., 273.75, PPP-AR/SDBS'de 35., 68.50., 34.75. epoklarda yakalanmıştır. Santimetre mertebesi doğruluk ise Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat fark değerleri için sırasıyla PPP'de 404., 1081., 1391.75., PPP-AR/SDBS'de 123.50., 508.25., 230. epoklarda yakalanmıştır. Buna göre PPP-AR çözümünün PPP'ye göre yakınsama

süresi yönünden daha iyi sonuçlar verdiği ve daha kısa sürede istenilen hassasiyetleri yakaladığı ortaya konulmuştur.

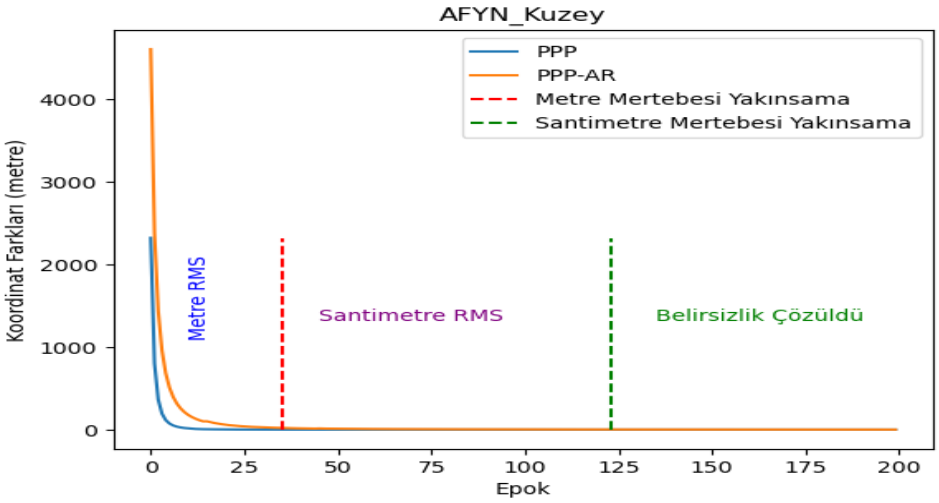
Tablo 4.10 PPP ve PPP-AR modelleri için metre mertebesi doğruluğu yakaladığı epoklar

	PPP-AR/SDBS			PPP		
	Kuzey	Doğu	Yukarı	Kuzey	Doğu	Yukarı
AFYN	33	76	28	195	92	264
HINI	37	66	39	23	104	286
NIGD	34	64	34	208	90	273
TOK1	36	68	38	226	93	272
Ortalama	35	68.50	34.75	215	94.75	273.75

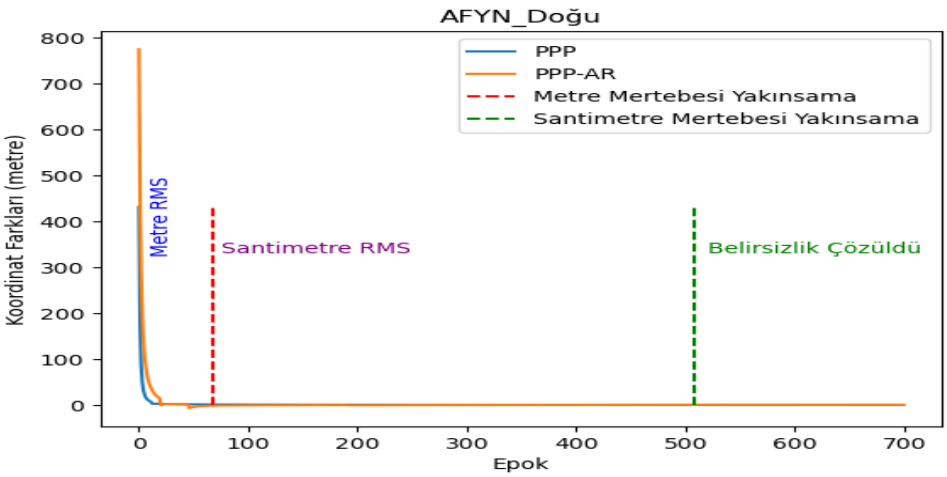
Tablo 4.11 PPP ve PPP-AR modelleri için santimetre mertebesi doğruluğu yakaladığı epoklar

	PPP-AR/SDBS			PPP		
	Kuzey	Doğu	Yukarı	Kuzey	Doğu	Yukarı
AFYN	147	555	151	380	1006	1398
HINI	207	495	272	442	1252	1403
NIGD	70	494	244	389	1028	1379
TOK1	70	489	253	405	1038	1387
Ortalama	123.50	508.25	230	404	1081	1391.75

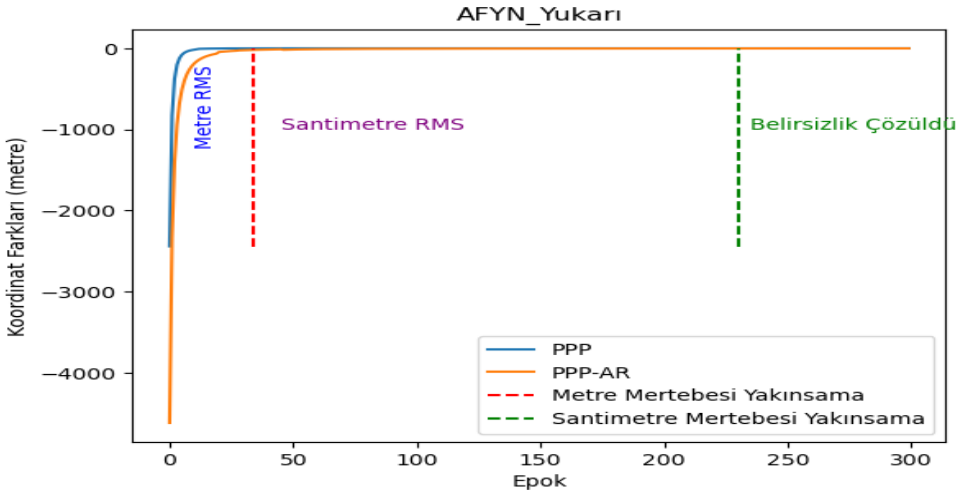
Simüle edilen gözlemlerin çözümünde filtrelenmiş EKK yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde bilinmeyenlere ait öncül varyans değerlerine bağlı olarak sadece ilk epoklarda hesaplanan koordinatların doğrulukları düşüktür. Bu çalışmada olası tüm hatalar dikkate alınarak öncül değerler belirlenmiştir. İstasyonların metre ve santimetre mertebesi yakınsama epokları Şekil 4.8, Şekil 4.9 ve Şekil 4.10'da AFYN istasyonunun PPP-AR ve PPP çözümleri üzerinden diğer istasyonları temsilen gösterilmiştir. PPP-AR çözümlerinin yakınsama sınır değerleri birbirleri arasında epok numarası yönünden fark göstermemektedir. Bu sebepten sadece PPP-AR/SDBS epok değerleri gösterilmiştir. Ayrıca PPP çözümünün epok yakınsama sınırı PPP-AR çözümüne göre oldukça farklıdır.



Şekil 4.8 Kuzey koordinatları için yakınsama sınırları



Şekil 4.9 Doğu koordinatları için yakınsama sınırları

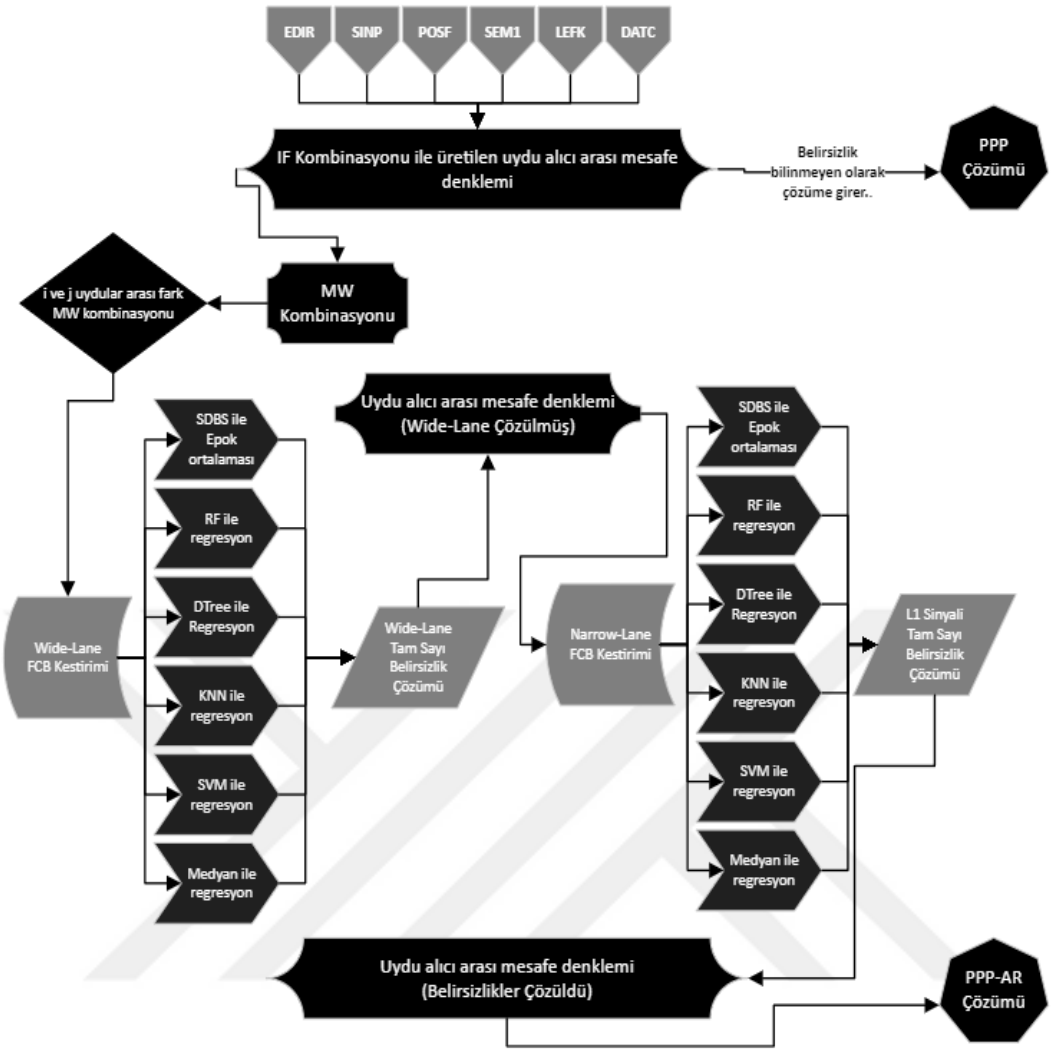


Şekil 4.10 Yukarı koordinatları için yakınsama sınırları

4.3.3.2 RF, SVM, DTree ve KNN Makine Öğrenmeleri Algoritmaları ile FCB kestirimi

Tamsayı belirsizliği çözümlerinde ayrıca SDBS modeline ek olarak RF, SVM, DTree ve KNN makine öğrenmesi algoritmaları kullanılarak da Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB kestirimleri gerçekleştirilmiştir. Kestirilen FCB ürünleri ile Wide-Lane tamsayı belirsizliği ve L_1 sinyali tamsayı belirsizliği çözümü elde edilmiştir. Böylece 2022 yılının 02-08 günlerinde istasyonlara ait PPP-AR çözümü yapılmıştır. PPP-AR çözümü yapılırken Wide-Lane belirsizlik ve L_1 sinyaline ait belirsizlik giderilmiştir. SDBS modelinin Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB kestirimlerinde (3.90) ve (3.101) bağıntılarına göre DATC, EDIR, LEFK, SINP, POSF ve SEM1 istasyonlarında her epok için ortalama değerler alınmıştır. Yeni çözüm modelinde epok ortalaması kullanmak yerine, daha efektif çözüm olan her epok için RF, SVM, DTree ve KNN kestirim algoritmaları kullanılarak Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB kestirimleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadan sonra (4.1) bağıntısındaki bilinmeyenlerin çözümü için EKK yöntemi uygulanır. Her istasyona ve her güne ait PPP ve PPP-AR çözümlerinin gerçek değerlerle olan farklarına ilişkin grafik çizimleri ekler kısmında gösterilmiştir.

PPP ve PPP-AR teknikleri çözümünde Wide-Lane ve Narrow-Lane FCB ürünlerinin karşılaştırma iş akışı Şekil 4.11'de gösterilmiştir.



Şekil 4.11 İstasyonlarda PPP-AR/SDBS ve PPP-AR/Makine öğrenmesi algoritmaları çözüm aşaması

4.3.3.3 Medyan Yönteminin Kullanılması

PPP-AR çözümü için Robust kestiricilerden Medyan kullanılarak Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB kestirimleri gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada ortalama değer kullanmak yerine medyan kestirici kullanmanın yakınsama süresine başarıları incelenmiştir. Her istasyonun PPP ve PPP-AR çözümlerinin gerçek değerlerle olan farkları çizdirilerek ek grafikler kısmında verilmiştir.

4.3.3.4 FCB Kestirimlerinin Karşılaştırılması

PPP-AR çözümlerinde bahsedilen farklı Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB kestirim modellerinin, PPP çözümüne göre yakınsama süresi yönünden daha başarılı olduğu bir önceki başlıklar altında gösterilmiştir. Bu başlık altında FCB kestirim modellerinin birbirleri arasında yakınsama süresi yönünden başarıları

incelenmiştir. Her güne ve her istasyona ait karşılaştırma, Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları üzerinden yapılmıştır. Referans koordinatları olarak simülasyonda kullanılan gerçek değerler alınmıştır. PPP-AR çözümlerinin Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları referans kabul edilen koordinatlardan çıkartılarak koordinat fark değerleri elde edilmiştir. Yakınsama süreleri için iki farklı kriter belirlenmiştir. İlk kriterde Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat fark değerlerinin metre mertebesi doğruluğa ulaşması dikkate alınmıştır. İkinci kriterde ise santimetre mertebesi doğruluğa ulaşması dikkate alınmıştır. Böylece istasyonların Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat fark metre mertebesi yakınsadığı ilk epok değeri ve santimetre mertebesi yakınsadığı ilk epok değeri Tablo 4.10 ve Tablo 4.11'de gösterilmiştir. PPP-AR/SDBS tekniğinde metre mertebesi yakınsama kriteri için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları için sırasıyla 35., 69. ve 35. epoklar bulunmuştur. AFYN, HINI, NIGD ve TOK1 istasyonlarının 7 günlük ortalama değerleri için metre mertebesi doğrulukta bu epoklar yakınsama sınırı olarak kabul edilmiştir. Tablo 4.12 ve

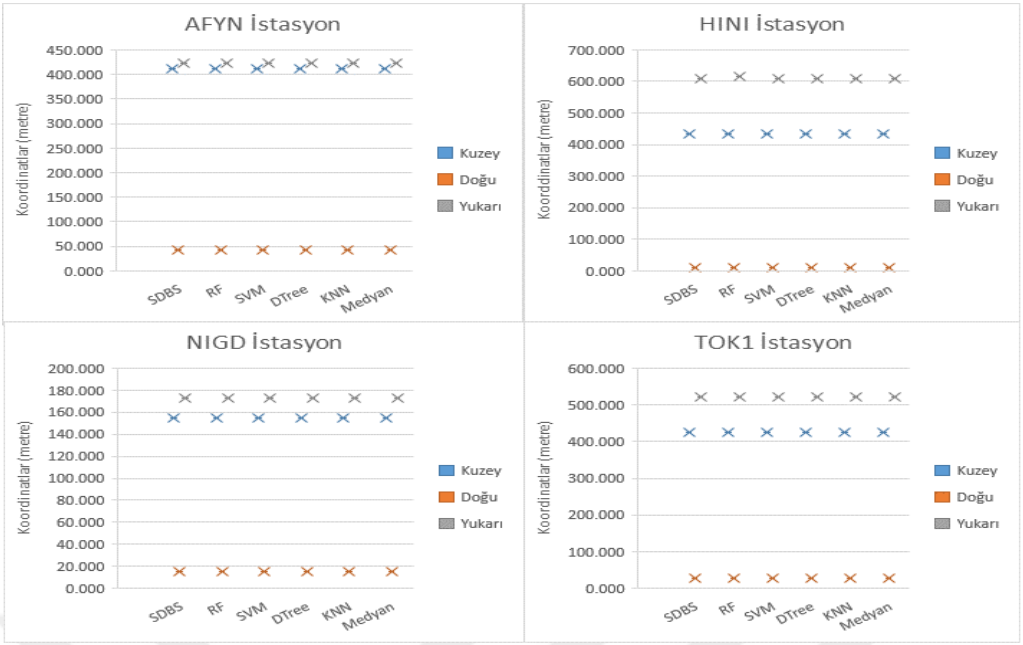
Şekil 4.12'de metre mertebesi Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat RMS değerleri gösterilmiştir. Burada kullanılan RMS değeri Denklem (4.2)'de gösterilmiştir.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i^2} \tag{4.2}$$

Burada n ölçülen değerlerin sayısını, x_i her bir ölçü değerinin gerçek değerden farkını temsil eder. Örneğin AFYN istasyonunun Kuzey koordinatlarının fark değerlerine ilişkin 7 günlük ilk 35 epoğu x_i olarak tanımlanırken n ise x_i'lerin adedini ifade eder. Kuzey koordinat fark değerleri için SDBS metre mertebesini 35. epokta yakaladığı için bu değer kullanılmıştır. Aynı koşullar altında Doğu koordinat fark değerleri için 69. epok, Yukarı koordinat fark değerleri için 35. epok yakınsama sınır olarak kabul edilmiştir.

Tablo 4.12 AFYN, HINI, NIGD ve TOK1 istasyonlarının metre mertebesi hassasiyet için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat RMS değerleri

AFYN				HINI			
	Kuzey (m)	Doğu (m)	Yukarı (m)		Kuzey (m)	Doğu (m)	Yukarı (m)
IF	927.721	97.351	949.225	IF	977.659	18.819	1360.181
SDBS	411.968	42.569	423.281	SDBS	433.334	10.046	607.032
RF	411.967	42.565	423.293	RF	433.328	10.041	614.231
DTree	411.969	42.568	423.290	DTree	433.334	10.044	607.031
KNN	411.965	42.565	423.290	KNN	433.331	10.043	607.034
Medyan	411.968	42.566	423.281	Medyan	433.333	10.045	607.030
SVM	411.966	42.566	423.286	SVM	433.332	10.044	607.034
NIGD				TOK1			
	Kuzey (m)	Doğu (m)	Yukarı (m)		Kuzey (m)	Doğu (m)	Yukarı (m)
IF	535.965	45.234	595.165	IF	959.198	56.047	1169.506
SDBS	154.529	14.738	172.776	SDBS	425.740	26.465	522.058
RF	154.526	14.736	172.785	RF	425.737	26.462	522.065
DTree	154.526	14.735	172.784	DTree	425.740	26.463	522.060
KNN	154.527	14.736	172.780	KNN	425.736	26.462	522.062
Medyan	154.528	14.737	172.776	Medyan	425.738	26.464	522.057
SVM	154.527	14.736	172.778	SVM	425.737	26.463	522.061



Şekil 4.12 AFYN, HINI, NIGD and TOK1 istasyonlarının 7 günlük ortalaması alınmış metre mertebesi hassasiyet için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatlarının RMS değerleri

Tablo 4.12 ve Şekil 4.12'de ifade edilen 7 günlük RMS değerlerinin istasyonlar ortalaması ve konum doğrulukları Tablo 4.13'de gösterilmiştir.

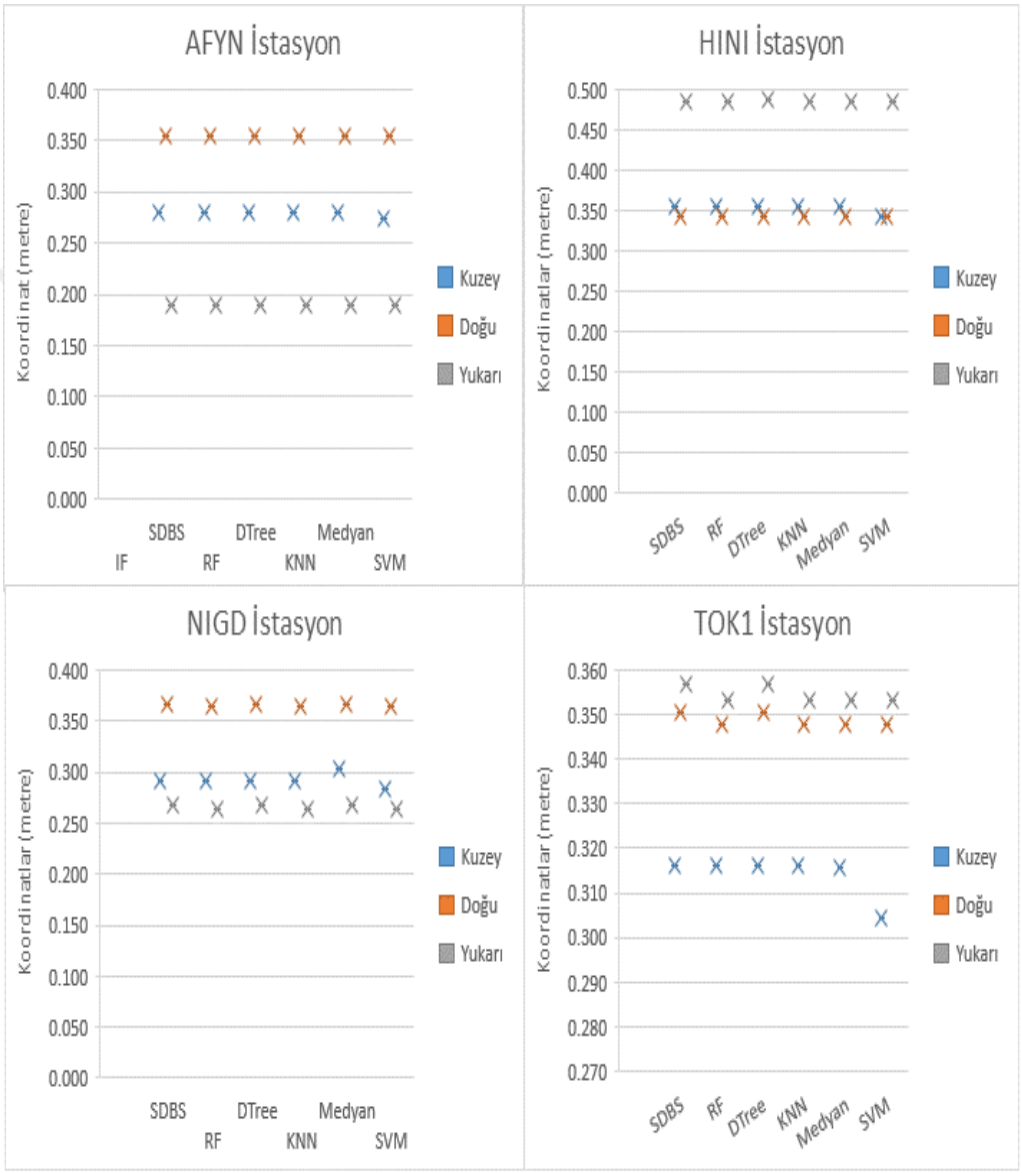
Tablo 4.13 İstasyonların metre yakınsama sınırı için 7 günlük RMS değerleri

	Kuzey (m)	Doğu (m)	Yukarı (m)	Yatay Konum Doğruluğu (m)
IF	850.136	54.363	1018.519	851.872
SDBS	356.393	23.455	431.287	357.164
RF	356.389	23.451	433.093	357.160
DTree	356.392	23.453	431.291	357.163
KNN	356.390	23.451	431.292	357.161
Medyan	356.392	23.453	431.286	357.163
SVM	356.390	23.452	431.290	357.161

Tablo 4.14 AFYN, HINI, NIGD ve TOK1 istasyonlarının santimetre mertebesi hassasiyet için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat RMS değerleri

AFYN				HINI			
	Kuzey (m)	Doğu (m)	Yukarı (m)		Kuzey (m)	Doğu (m)	Yukarı (m)
IF	9.633	0.526	9.585	IF	11.476	0.397	11.052
SDBS	0.280	0.354	0.190	SDBS	0.355	0.341	0.485
RF	0.280	0.354	0.189	RF	0.355	0.341	0.485
DTree	0.280	0.354	0.190	DTree	0.355	0.342	0.487
KNN	0.280	0.354	0.189	KNN	0.355	0.341	0.485
Medyan	0.280	0.354	0.189	Medyan	0.355	0.342	0.485
SVM	0.273	0.354	0.189	SVM	0.342	0.341	0.485
NIGD				TOK1			
	Kuzey (m)	Doğu (m)	Yukarı (m)		Kuzey (m)	Doğu (m)	Yukarı (m)
IF	10.010	0.499	9.241	IF	10.974	0.472	10.048
SDBS	0.290	0.367	0.267	SDBS	0.316	0.350	0.357
RF	0.291	0.364	0.264	RF	0.316	0.348	0.353
DTree	0.290	0.367	0.267	DTree	0.316	0.350	0.357
KNN	0.291	0.364	0.264	KNN	0.316	0.348	0.353
Medyan	0.304	0.366	0.268	Medyan	0.316	0.348	0.353
SVM	0.282	0.364	0.264	SVM	0.304	0.348	0.353

PPP-AR/SDBS tekniğinde santimetre mertebesi yakınsama için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları sırasıyla 124., 509. ve 230. epokta yakınsama sağladığı gösterilmiştir. AFYN, HINI, NIGD ve TOK1 istasyonlarının 7 günlük ortalama değerleri için santimetre mertebesi doğrulukta bu epoklar yakınsama sınırı kabul edilmiştir. Tablo 4.14 ve Şekil 4.13'de santimetre mertebesi Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları RMS değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.13 AFYN, HINI, NIGD and TOK1 istasyonlarının 7 günlük ortalaması alınmış santimetre mertebesi hassasiyet için Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları RMS değerleri

Tablo 4.14 ve Şekil 4.13'de ifade edilen 7 günlük RMS değerlerinin istasyonlar ortalaması ve konum doğruluklar Tablo 4.15'de gösterilmiştir.

Tablo 4.15 İstasyonların santimetre yakınsama sınır için 7 günlük RMS değerleri

	Kuzey (m)	Doğu (m)	Yukarı (m)	Yatay Konum Doğruluğu (m)
IF	10.523	0.474	9.981	10.534
SDBS	0.310	0.353	0.325	0.470
RF	0.311	0.352	0.323	0.469
DTree	0.310	0.353	0.325	0.470
KNN	0.311	0.352	0.323	0.469
Medyan	0.314	0.352	0.324	0.472
SVM	0.301	0.352	0.323	0.463

Tablo 4.16 Yakınsama sınırına göre tamsayı belirsizliği belirlendikten sonra 7 günlük RMS değerleri

	Kuzey (m)	Doğu (m)	Yukarı (m)	Yatay Konum Doğruluğu (m)
IF	0.379	0.101	0.260	0.392
SDBS	0.028	0.058	0.047	0.065
RF	0.028	0.058	0.047	0.065
DTree	0.028	0.058	0.047	0.065
KNN	0.028	0.058	0.047	0.065
Medyan	0.040	0.060	0.056	0.072
SVM	0.028	0.058	0.047	0.065

Tablo 4.16'da yakınsama sınırlarına göre tamsayı belirsizliği çözüldükten sonra 7 günlük Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatların RMS değerleri ve konum doğruluğu gösterilmiştir.

PPP çözümü için Tablo 4.11'de santimetre mertebesi doğruluğa Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları sırasıyla 404., 1081., 1391.75 epoklarda yakınsamıştır. Bu yakınsama epokları kullanılarak Tablo 4.17'de PPP çözümü için tamsayı belirsizliği çözüldükten sonra Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları verilmiştir.

Tablo 4.17 PPP çözümünün tamsayı belirsizliği belirlendikten sonra 7 günlük RMS değerleri

PPP Çözümü	Kuzey (m)	Doğu (m)	Yukarı (m)	Yatay Konum Doğruluğu (m)
AFYN	0.042	0.042	0.047	0.059
HINI	0.035	0.049	0.049	0.060
NIGD	0.036	0.046	0.049	0.058
TOK1	0.037	0.047	0.047	0.060
Ortalama	0.037	0.046	0.048	0.059

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

PPP tekniği kullanılarak elde edilen konum doğruluğu tespit edilen hata kaynaklarının çözüme dahil edilmesiyle iyileşmektedir. Tamsayı belirsizliği çözümü PPP'nin kalitesini etkileyen en önemli hata kaynaklarından biri olduğu için farklı fonksiyonel modeller altında, bu fonksiyonel modellere uygulanacak farklı algoritmalar ile incelenebilir. PPP çözümünde tamsayı belirsizliği üzerine yapılan çalışmalar PPP-AR çözümlerini ortaya çıkarmıştır. Literatürde PPP-AR tekniği SDBS, PCM ve DCM tamsayı belirsizliği çözüm modelleri ile farklı matematiksel modeller altında irdelenmektedir. Bu modeller geliştirilerek yakınsama süresini kısaltmaya yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Bu tez çalışmasının üç farklı aşamasında PPP ve PPP-AR çözümleri gerçekleştirilmiştir. Üç farklı aşamanın birincisinde PPP-AR servislerinin (WUHAN, CODE, CNES, JAXA) tamsayı belirsizliği çözüm başarıları irdelenmiştir. İkinci aşamada PPP-AR servislerinden WUHAN ve GRG'nin RT-PPP tekniğine göre tamsayı belirsizliği çözüm başarısı yakınsama süresi yönünden ortaya konulmuştur. Üçüncü çalışmada ise PPP-AR tekniğinin Wide-Lane belirsizliği ve L_1 sinyali belirsizliği makine öğrenmeleri algoritmaları ile geliştirilerek çözüm başarısı analiz edilmiştir.

Birinci aşamada WUHAN, CODE, CNES ve JAXA servisleri tarafından yayınlanan FCB ürünlerinin başarısı incelenmiştir. Net_Diff v1.14 yazılımı kullanılarak PPP-AR tekniği ve PPP tekniği yakınsama süreleri karşılaştırılmıştır. 40 IGS istasyonunun 2022 yılına ait 54., 55., 56., 57., 58., 59., 60., 61., 62. ve 63. günlerinde 24 saatlik GPS+GLONASS gözlemleri PPP ve PPP-AR (WUHAN, CODE, CNES, JAXA) tekniklerinde değerlendirilmiştir. 40 IGS istasyonuna ait PPP ve PPP-AR çözümlerinden Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları üretilmiştir. Referans koordinatlar IGS haftalık çözüm koordinatlarından elde edilmiştir. Referans kabul edilen istasyon koordinat değerleri ile ölçüm koordinatları arasında fark alınarak Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat fark değerleri üretilmiştir. Buna göre üretilen koordinat fark değerleri 0.05 m ve 0.01 m doğruluğa ulaştığında yakınsadığı kabul edilmiştir. Seçilen IGS istasyonlarında ölçümlerin kaçıncı epokta

yakınsadığı tespit edilmiş ve 10 günlük ortalaması alınmıştır. Elde edilen sonuçlara göre WUHAN servisinin tamsayı belirsizliği çözüm başarısının hem yakınsama süresi yönünden hem de koordinat fark değerleri yönünden diğer servislere göre daha iyi sonuç verdiği ortaya konulmuştur.

İkinci aşamada 29 Eylül 2022 tarihinde 13:00-16:00 zaman aralığında DLF1 ve GOPE istasyonlarında GPS+GLONASS uyduları ile BNC v2.12.18 yazılımı üzerinden yörünge saat düzeltmesi SSR0BKG0 seçilerek RT-PPP ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Net_Diff v1.14 yazılımı kullanılarak PPP-AR servislerinin karşılaştırıldığı bir önceki uygulamada sadece WUHAN, CODE, CNES ve JAXA servislerine ait uydu kayıklıkları kullanabilmektedir. Net_Diff v1.15 yazılımı GRG servisinin yayınladığı uydu kayıklık değerlerini de kullanılabilmeye olanak sağlamaktadır. Tez çalışmasının bu aşamasında Net_Diff v1.15 yazılımı kullanılarak DLF1 ve GOPE istasyonlarında GRG ve WUHAN servislerinin üretmiş olduğu FCB ürünleri ile PPP-AR çözümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, RT-PPP tekniği tamsayı belirsizliği çözüldükten sonra desimetre hassasiyetinde konum üretebilirken, yakınsama süresi yönünden RTCM-SSR mesajlarının gelişim süreci henüz hedeflenen yakınsama başarısına ulaşamamıştır.

Tez çalışmasının son aşamasında PPP ve PPP-AR tekniklerinin matematiksel modelleri Python dilinde kodlanarak geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla 2022 yılının 2-8 günleri arasında 10 TUSAGA-Aktif istasyonu gözlem dosyalarından çözümler sağlanmıştır. Bu gözlem dosyalarında troposfer, iyonosfer gibi hata kaynaklarından arındırılmış simülasyon verisi oluşturulmuştur. Simülasyon verisi ile FCB hatasının etkisi incelenmiştir. Bu simülasyon verileri kullanılarak 6 TUSAGA-Aktif istasyonu (DATC, EDIR, LEFK, SINP, POSF ve SEM1) ile Wide-Lane ve Narrow-Lane FCB değerleri hesaplanmış, her uydu için hesaplanan FCB değerleri ile 4 TUSAGA-Aktif istasyonunda (AFYN, HINI, NIGD ve TOK1) Wide-Lane belirsizlik ve L_1 belirsizlik çözümü yapılmıştır. SDBS modelinin Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB kestirim aşamalarında epok ortalaması modeli kullanılmaktadır. Python'da kodlanan çözüm modelinde epok ortalaması kullanmak yerine her epok için makine öğrenmesi algoritmaları ve Robust kestirici kullanılarak daha doğru FCB değeri üretilmeye çalışılmıştır. Wide-Lane FCB ve Narrow-Lane FCB kestiriminde makine öğrenmesi algoritmaları için RF, SVM, DTree ve KNN algoritmaları tercih edilmiştir. Bu algoritmalar ile tamsayı

belirsizliği başarısı Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinat değerleri üzerinden metre mertebesi ve santimetre mertebesi doğruluk olarak iki farklı yakınsama kriterinde incelenmiştir. PPP-AR/SDBS çözümü yakınsama epok değeri yönünden makine öğrenmesi algoritması ile güçlendirilmiş çözümler ile benzerlik göstermektedir. Bu sebepten yakınsama sınırının PPP-AR/SDBS çözümünden seçilmesi karşılaştırma kriterini etkilemeyecektir. Bununla birlikte yakınsama süreleri benzer olsa da faklı PPP-AR çözümlerinde milimetre mertebesinde farklı konum doğrulukları elde edilmiştir. PPP-AR/SDBS tekniğinde metre mertebesi yakınsama kriteri dikkate alındığında Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları için sırasıyla 35., 69. ve 35. epoklar bulunmuştur. AFYN, HINI, NIGD ve TOK1 istasyonlarının 7 günlük ortalama değerleri için metre mertebesi doğrulukta bu epoklar yakınsama sınırı kabul edilmiştir. AFYN istasyonunda metre mertebesi en iyi doğruluk sağlayan KNN algoritmasıdır. HINI istasyonunda metre mertebesi en iyi doğruluk sağlayan RF algoritmasıdır. NIGD istasyonunda metre mertebesi en iyi doğruluk sağlayan DTree algoritmasıdır. TOK1 istasyonunda metre mertebesi en iyi doğruluk sağlayan KNN algoritmasıdır. AFYN, HINI, NIGD ve TOK1 istasyonlarının ortalama konum doğruluklarına bakıldığında metre mertebesinde bütün algoritmalar SDBS'den daha iyi konum doğruluğu üretirken, algoritmalar arası en iyi yatay doğruluğu RF algoritması üretmiştir. PPP-AR/SDBS tekniğinde santimetre mertebesi yakınsama kriteri dikkate alındığında Kuzey, Doğu ve Yukarı koordinatları için sırasıyla 124., 509. ve 230. epokta yakınsama sağladığı gösterilmiştir. AFYN, HINI, NIGD ve TOK1 istasyonlarının 7 günlük RMS değerleri için santimetre mertebesi yakınsamada bu epoklar sınır kabul edilmiştir. AFYN istasyonunda santimetre mertebesi en iyi doğruluk sağlayan SVM algoritmasıdır. HINI istasyonunda santimetre mertebesi en iyi doğruluk sağlayan SVM algoritmasıdır. NIGD istasyonunda santimetre mertebesi en iyi doğruluk sağlayan SVM algoritmasıdır. TOK1 istasyonunda santimetre mertebesi en iyi doğruluk sağlayan SVM algoritmasıdır. AFYN, HINI, NIGD ve TOK1 istasyonların ortalama konum doğruluklarına bakıldığında SDBS 0.470 m, RF 0.469 m, SVM 0.463 m, DTree 0.470 m, KNN 0.469 m olarak bulunmuştur. Buna göre santimetre mertebesinde bütün algoritmalar SDBS'den daha iyi konum doğruluğu üretirken, algoritmalar arası en iyi konum doğruluğu değerini SVM algoritması üretmiştir. Bu uygulama kapsamında Robust kestiricilerden medyan

yöntemi de metre ve santimetre doğruluk kriterleri üzerinden test edilmiştir. Medyan doğruluklara bakıldığında SDBS ile aynı doğruluklara sahiptir.

Bu sonuçlardan yola çıkarak gelecek çalışmalarda bölgesel ağlar kullanılarak kullanıcılara uydu FCB ürünlerini hesaplayıp yayınlayacak bir yazılım geliştirilebilir. Geliştirilecek yazılım mikrodenetleyici tabanlı Ardunio platformu üzerinden GPS sensörleri ile birlikte kullanılabilir. Ayrıca SDBS modeline makine öğrenmesi algoritmaları uygulandığı gibi PCM modeline de makine öğrenmesi algoritması uygulanarak FCB kestirimi incelenebilir. Bununla birlikte farklı robust kestirim yöntemlerinin ile FCB hesabına katkısı araştırılabilir.

KAYNAKÇA

Alçay, S., & Atiz, Ö. F. (2021). Farklı yazılımlar kullanılarak gerçek zamanlı hassas nokta konum belirleme (RT-PPP) yönteminin performansının incelenmesi. *Journal of Geomatics, 6(1)*, 77–83. https://doi.org/10.29128/geomatik.687709

Bahadur, B. (2017). *Improving the Performance of Precise Point Positioning with Multi-GNSS* [Ms. C. Thesis]. Department of Geodesy., Hacettepe University

Blewitt, G. (1997). *Basics of the GPS Technique: Observation Equations. Geodetic Applications of GPS*, 1–46.

Borre, K., Akos, D. M., Bertelsen, N., Rinder, P., & Jensen, S. H. (2007). A software-defined GPS and Galileo Receiver: a single-frequency approach. Springer Science & Business Media.

Cai, C., Gong, Y., Gao, Y., & Kuang, C. (2017). An approach to speed up single-frequency PPP convergence with quad-constellation GNSS and GIM. *Sensors (Switzerland), 17(6)*,1302. https://doi.org/10.3390/s17061302

Chen, D. (1993). Fast Ambiguity Search Filter (FASF): A Nova1 Concept for GPS Ambiguity Resolution. In *Proceedings of the 6th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1993)* (pp. 781-787). https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=4383

Collins, P. (2008). Isolating and estimating undifferenced GPS integer ambiguities. In *Proceedings of the 2008 national technical meeting of the institute of navigation* (pp. 720-732)

Collins, P., Bisnath, S., Lahaye, F., & Héroux, P. (2010). Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing. Navigation, *Journal of the Institute of Navigation, 57(2)*, 123–135. https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2010.tb01772.x

Colombo, O. L., Sutter, A. W., & Evans, A. G. (2004). Evaluation of precise, kinematic GPS point positioning. In *Proceedings of the 17th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS 2004)* (pp. 1423-1430)

Dai, Z., Dai, X., Zhao, Q., & Liu, J. (2019). Improving real-time clock estimation with undifferenced ambiguity fixing. *GPS Solutions, 23*,1-12. https://doi.org/10.1007/s10291-019-0837-z

Erdogan, B., Karlitepe, F., Ocalan, T., & Tunalioglu, N. (2018). Performance analysis of Real Time PPP for transit of Mercury. *Measurement, 129*,358-367. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.050

Evren, S. Ş. (2022,). Bilgisayar Kavramları. https://bilgisayarkavramlari.com. [Erişim Tarihi:7 Eylül 2022]

Frei, E. (1991). Rapid differential positioning with the Global Positioning System (GPS). *Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz*, 44.

Gabor, M. J., & Nerem, S. R. (1999). GPS carrier phase ambiguity resolution using satellite-satellite single differences. In *Proceedings of the 12th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GPS 1999)* (pp.1569-1578).

Gaye, B., Zhang, D., & Wulamu, A. (2021). Improvement of Support Vector Machine Algorithm in Big Data Background. *Mathematical Problems in Engineering, 2021*, 1-9. https://doi.org/10.1155/2021/5594899

Ge, M., Gendt, G., Dick, G., & Zhang, F. P. (2005). Improving carrier-phase ambiguity resolution in global GPS network solutions. *Journal of Geodesy, 79*, 103–110. https://doi.org/10.1007/s00190-005-0447-0

Ge, M., Gendt, G., Rothacher, M., Shi, C., & Liu, J. (2008). Resolution of GPS carrier-phase ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with daily observations. *Journal of Geodesy, 82*, 389–399. https://doi.org/10.1007/s00190-007-0187-4

Geng, J., Meng, X., Dodson, A. H., & Teferle, F. N. (2010). Integer ambiguity resolution in precise point positioning: Method comparison. *Journal of Geodesy, 84(9)*, 569–581.https://doi.org/10.1007/s00190-010-0399-x

Geng, J., Meng, X., Teferle, F. N., & Dodson, A. H. (2008). Hourly Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution. https://www.loran.org/proceedings/Meeting2008/Papers/Geng_6B3.pdf

Geng, J., Teferle, F. N., Meng, X., & Dodson, A. H. (2011). Towards PPP-RTK: Ambiguity resolution in real-time precise point positioning. *Advances in Space Research, 47(10)*, 1664–1673. https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.03.030

Geng, J., Teferle, F. N., Shi, C., Meng, X., Dodson, A. H., & Liu, J. (2009). Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data. *GPS Solutions, 13*, 263–270. https://doi.org/10.1007/s10291-009-0119-2

Geng, J., Zhang, Q., Li, G., Liu, J., & Liu, D. (2022). Observable-specific phase biases of Wuhan multi-GNSS experiment analysis center's rapid satellite products. *Satellite Navigation, 3(1).* 1-15 https://doi.org/10.1186/s43020-022-00084-0

GFZ. (2021). German Research Centre for Geosciences GNSS Data Centre. https://isdc.gfz-potsdam.de/gnss-station-network/. [Erişim Tarihi: 23 Nov. 2021]

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (1997). *Global Positioning System: Theory and Applications.* Springer Vienna. https://doi.org/10.1007/978-3-7091-5126-6

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

Hu, J., ve Hu, C. (2023). A WiFi Indoor Location Tracking Algorithm Based on Improved Weighted K Nearest Neighbors and Kalman Filter. *IEEE Access,* 11, 32907–32918. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3263583

IGS. (2022). Federal Coğrafi Bilgi (BKG)- Uluslararası GNSS Servisi Alman Bölgesel Ağı. https://igs.bkg.bund.de/. [Erişim Tarihi: 11 Nov. 2022]

Junjie, L. (2003). *Implementation and Analysis of GPS Ambiguity Resolution Strategies in Single and Multiple Reference Station Scenarios* [Ph.D. Thesis]. University Of Calgary CANADA.

Karlitepe, F., Tunalıoğlu, N., Erdogan, B. (2020). Performance evaluation of real time precise point positioning for Multi-GNSS concept. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, 38.4,* 2231-2244.

Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products. *GPS Solutions, 5(2),* 12–28. https://doi.org/10.1007/PL00012883

Kurt, O. (2003). *GPS ölçülerinin değerlendirilmesinde başlangıç faz belirsizliğinin araştırılması* [Doktora Tezi]. Jeodezi ve Fotoğrametre ABD., Yıldız Teknik Üniversitesi.

Lachapelle, G., Cannon, M. E., & Lu, G. (1992). High-precision GPS navigation with emphasis on carrier-phase ambiguity resolution. *Marine Geodesy, 15(4),* 253–269. https://doi.org/10.1080/01490419209388062

Laurichesse, D. (2011). The CNES Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution demonstrator. In *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011),* (pp. 654–662).

Laurichesse, D., & Banville, S. (2018). Innovation: Instantaneous centimeter-level multi-frequency precise point positioning. GPS World, July.

Laurichesse, D., & Blot, A. (2016). Fast PPP convergence using multi-constellation and triple-frequency ambiguity resolution. *29th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, ION GNSS 2016, 3*, (pp. 2082–2088). https://doi.org/10.33012/2016.14633

Laurichesse, D., Mercier, F., Berthias, J., Broca, P., & Cerri, L. (2009). Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination. *Navigation, Journal of the Institute of Navigation, 56(2),* (pp. 135–149). https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.2009.tb01750.x

Laurichesse, D., Mercier, F., & Berthias, J. P. (2010). Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution, experimental results. *23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, (ION GNSS 2010*), 3, (pp.2534–2544).

Laurichesse, D., & Privat, A. (2015). An open-source PPP client implementation for the CNES PPP-WIZARD demonstrator. *28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, (ION GNSS+ 2015),* (pp. 2780–2789).

Li, P., Zhang, X., Ren, X., Zuo, X., & Pan, Y. (2016). Generating GPS satellite fractional cycle bias for ambiguity-fixed precise point positioning. *GPS Solutions, 20*, 771–782. https://doi.org/10.1007/s10291-015-0483-z

Li, T., Wang, J., & Laurichesse, D. (2014). Modeling and quality control for reliable precise point positioning integer ambiguity resolution with GNSS modernization. *GPS Solutions, 18*, 429–442. https://doi.org/10.1007/s10291-013-0342-8

Li, X., Ge, M., Zhang, H., & Wickert, J. (2013). A method for improving uncalibrated phase delay estimation and ambiguity-fixing in real-time precise point positioning. *Journal of Geodesy*, *87*, 405–416. https://doi.org/10.1007/s00190-013-0611-x

Li, X., & Zhang, X. (2012). Improving the estimation of uncalibrated fractional phase offsets for PPP ambiguity resolution. *Journal of Navigation, 65(3)*, 513–529. https://doi.org/10.1017/S0373463312000112

Loyer, S., Perosanz, F., Mercier, F., Capdeville, H., & Marty, J. C. (2012). Zero-difference GPS ambiguity resolution at CNES-CLS IGS Analysis Center. *Journal of Geodesy,86*, 991–1003.https://doi.org/10.1007/s00190-012-0559-2

Nykiel, G., & Figurski, M. (2016). Precise point positioning method based on wide-lane and narrow-lane phase observations and between satellites single differencing. In *Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, 2(February)*, 1055–1066.

Öcalan, T. (2015). *Gnss Ağlarinda Gps Hassas Nokta Konumlama (Gps-Ppp Tekniği Yaklaşımlı Çözümler,* [Doktora Tezi], Harita Mühendisliği ABD., Yıldız Teknik Üniversitesi.

Öcalan, T., ve Soycan, M. (2012). RTCM/SSR Mesajları İle Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konumlama (PPP-RTK) Tekniği. *HaritaTeknolojileri Elektronik Dergisi, 2012(2)*, 30–41.

Odijk, D. (2003). Ionosphere-Free Phase Combinations for Modernized GPS. *Journal of Surveying Engineering*, *129(4)*, 165–173. https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9453(2003)129:4(165)

Pratt, M., Burke, B., & Misra, P. (1997). Single-Epoch Integer Ambiguity Resolution with GPS L1-L2 Carrier Phase Measurements. *Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1997)*, 1737–1746. https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=2837

Purwanto, A. D., Wikantika, K., Deliar, A., & Darmawan, S. (2023). Decision Tree and Random Forest Classification Algorithms for Mangrove Forest Mapping in Sembilang National Park, Indonesia. *Remote Sensing*, *15(1)*, 16. https://doi.org/10.3390/rs15010016

Rizos, C., & Han, S. (1995). A New Method for Constructing Multi-satellite Ambiguity Combinations for lmproved Ambiguity Resolution. *Proceedings of the 8th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1995)*, (pp. 1145–1153). https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=2349

RTCM SC-104 SSR Working Group, & IGS Real-Time Working Group. (2020). IGS State Space Representation (SSR) Format.

Shi, J. (2012). *Precise Point Positioning Integer Ambıguity Resolution with Decoupled Clocks* [Ph. D. Thesis]. In Journal of Chemical Information and Modeling (Vol. 53, Issue 9). University of Calgary.

Shi, J., & Gao, Y. (2012). Improvement of PPP-inferred tropospheric estimates by integer ambiguity resolution. *Advances in Space Research, 50(10)*, 1374–1382. https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.06.036

Shi, J., & Gao, Y. (2014). A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods. *GPS Solutions, 18(4),* 519–528. https://doi.org/10.1007/s10291-013-0348-2

Subirana, S. J., Zornoza, J. J. M., & Hernandez-Pajares, M. (2013). *GNSS data processing Volume I : Fundamentals and algorithms*. Noordwijk, Netherlands: European Space Agency (ESA) Comunication.

Teunissen, P. J. G. (1993). Least-Squares Estimation of the Integer GPS Ambiguities. *IAG general meeting*, Beijing, China, (pp. 1–16).

Teunissen, P. J. G., Joosten, P., & Tiberius, C. (2002). A comparison of TCAR, CIR and LAMBDA GNSS ambiguity resolution. In *Proceedings of the 15th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GPS 2002)*, (pp. 2799–2808).

Teunissen, P. J. G., & Odijk, D. (2003). Rank-defect integer estimation and phase-only modernized GPS ambiguity resolution. *Journal of Geodesy, 76(9–10),* 523–535. https://doi.org/10.1007/s00190-002-0285-2

Teunissen P., & Kleusberg A. (1998). *GPS for Geodesy*. Springer Science & Business Media

Teunissen P., & Oliver M. (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems* (Vol. 10, pp. 978-3). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42928-1

Weber, G., Mervart, L., Stürze, A., Rülke, A., & Stöcker, D. (2016). BKG Ntrip Client (BNC) Version 2.12. In Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (2.12; Issue January). https://software.rtcm-ntrip.org/export/HEAD/ntrip/trunk/BNC/src/bnchelp.html

Witchayangkoon, B. (2000). *Elements of GPS Precise Point Positioning*. In The Graduate School The University of Maine.

Yi, W., Song, W., Lou, Y., Shi, C., & Yao, Y. (2016). A method of undifferenced ambiguity resolution for GPS+GLONASS precise point positioning. *Scientific Reports, 6(1),* 1–14. https://doi.org/10.1038/srep26334

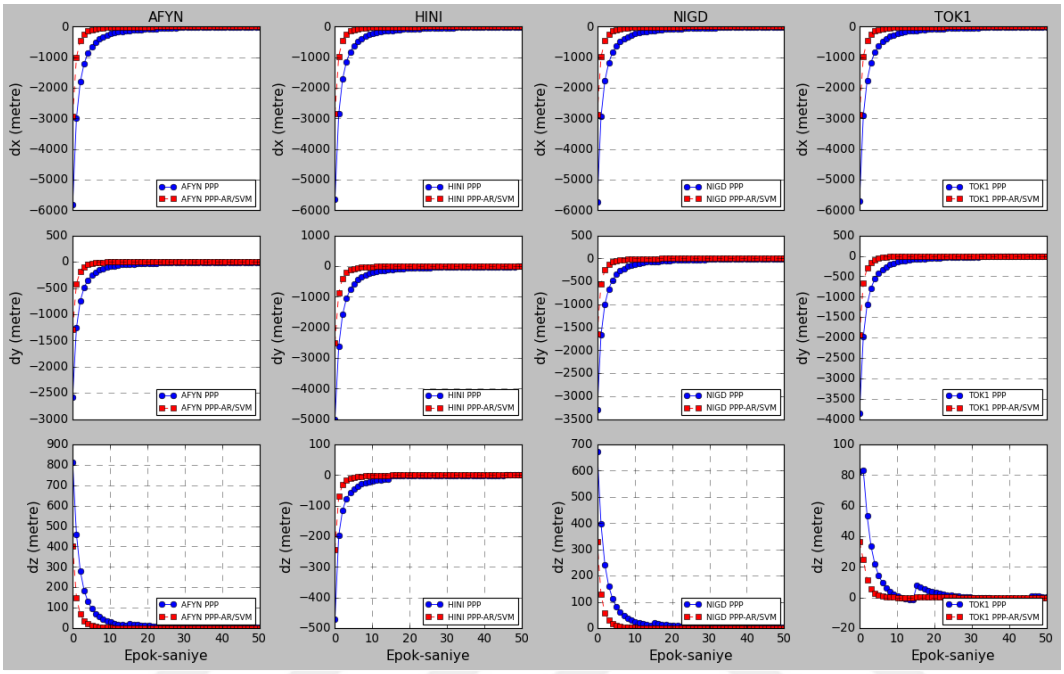
Yize, Z. (2020). A Guide To Use Net_Diff (v1.14; pp. 1–35). https://github.com/YizeZhang/Net_Diff. [Erişim Tarihi 02.10.2021]

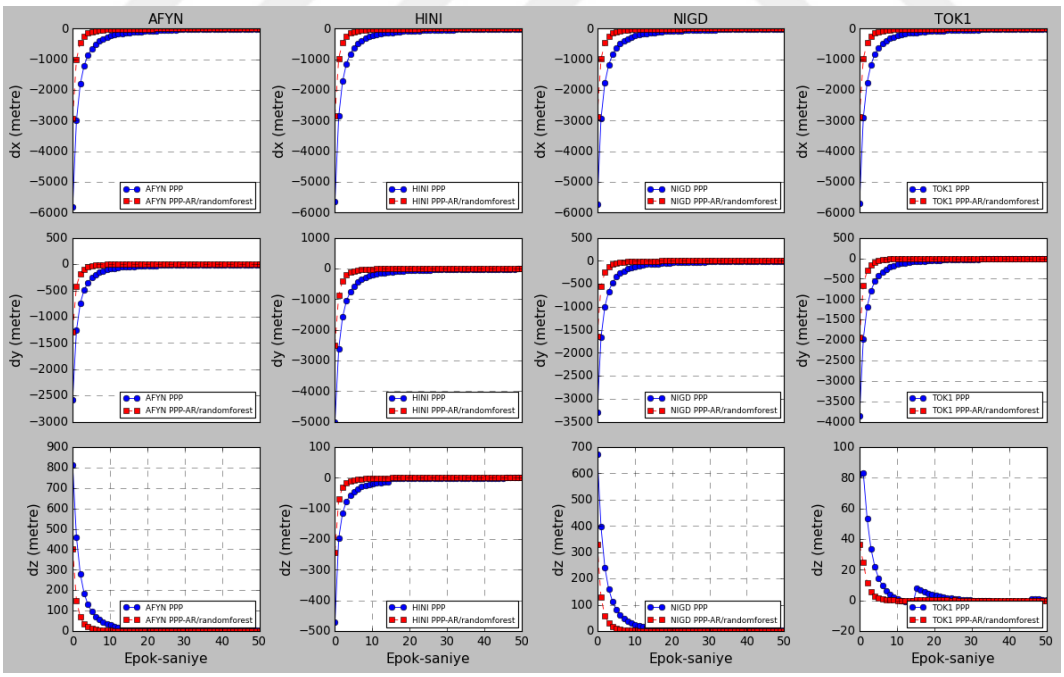
Yoon, S. P., & Lundberg, J. B. (2002). An integer ambiguity resolution algorithm for real-time GPS attitude determination. *Applied Mathematics and Computation, 129(1),* 21–41. https://doi.org/10.1016/S0096-3003(01)00029-7

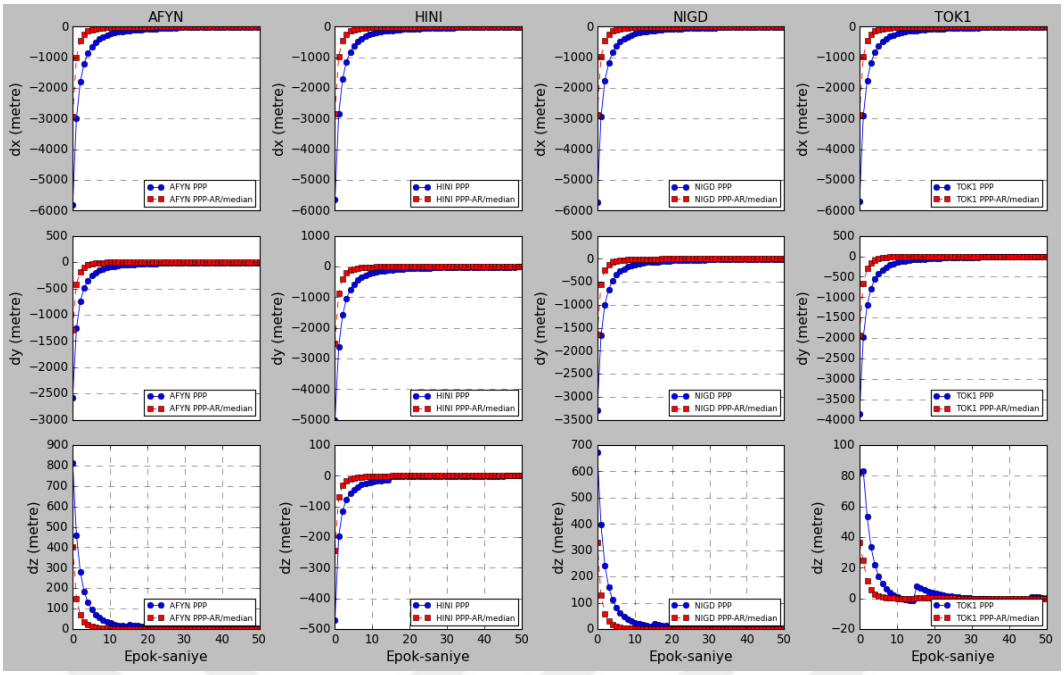
Zhang, X., Li, P., & Guo, F. (2013). Ambiguity resolution in precise point positioning with hourly data for global single receiver. *Advances in Space Research, 51(1),* 153–161. https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.08.008

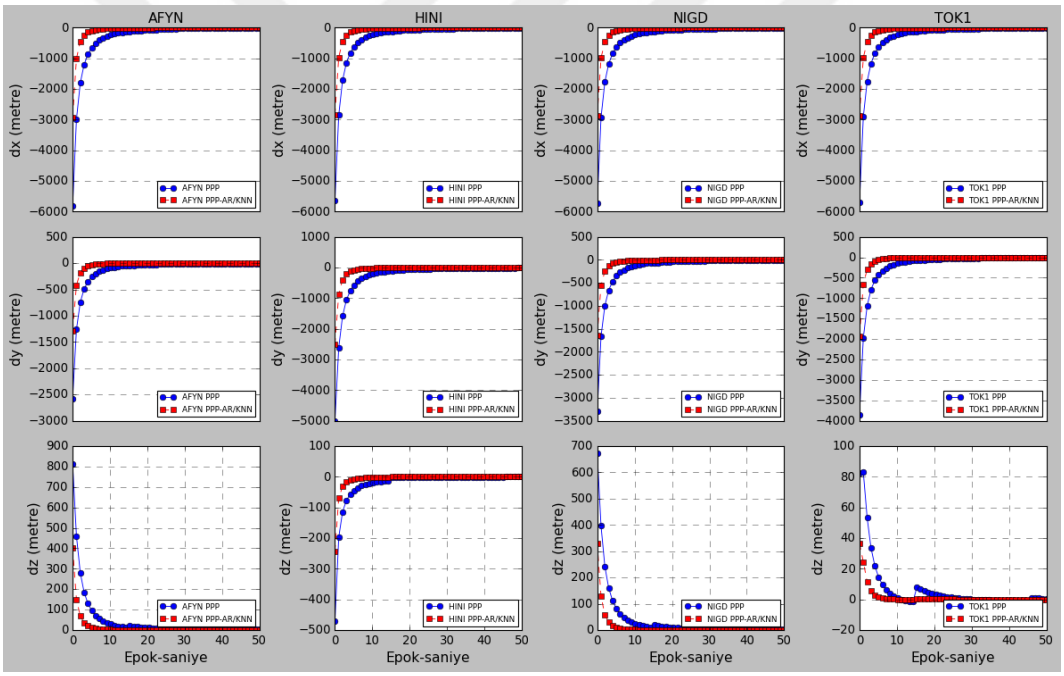
Zumberge, J. F., Heftin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., & Webb, F. H. (1997). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *In Journal of Geophysical Research (Vol. 102, Issue B3)*. https://doi.org/10.1029/96JB03860

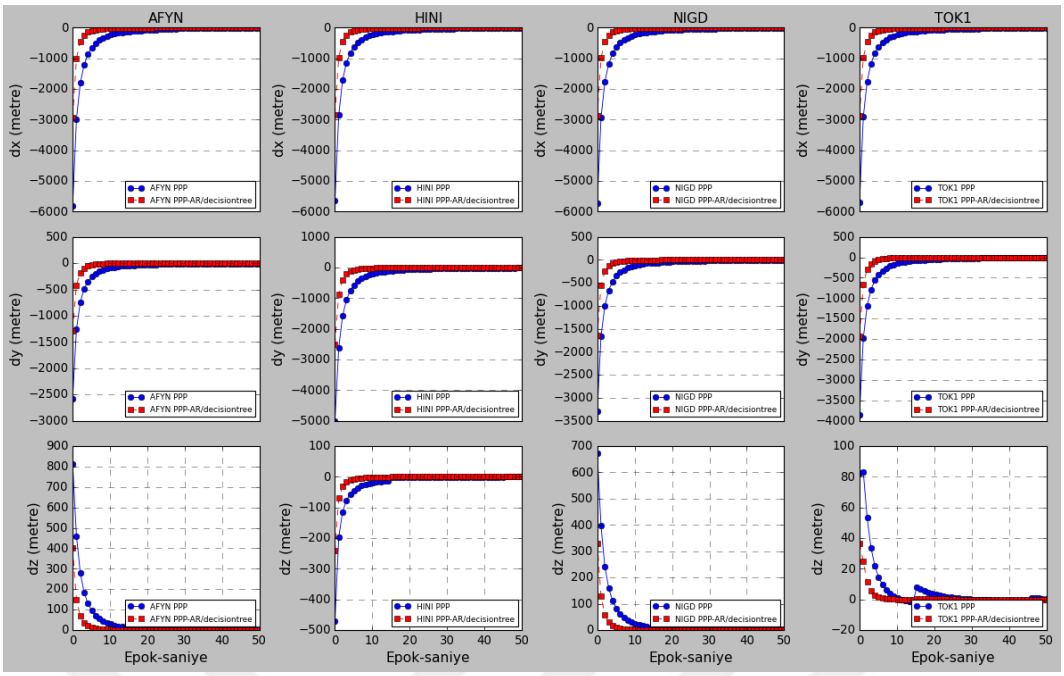
A
2022.02 GÜNÜ GRAFİKLER

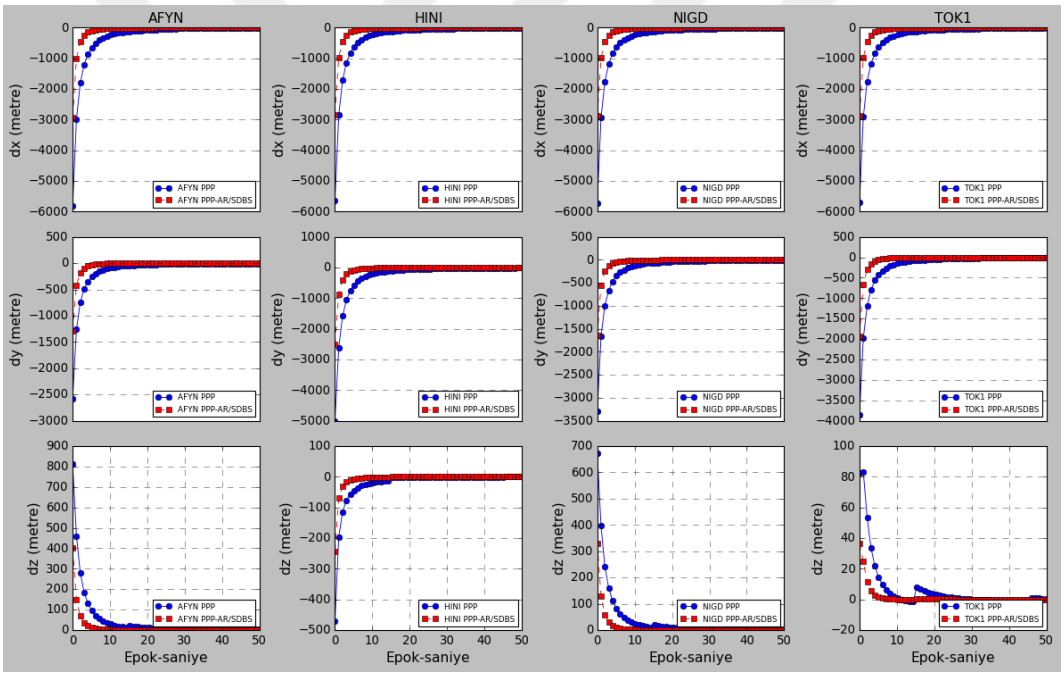




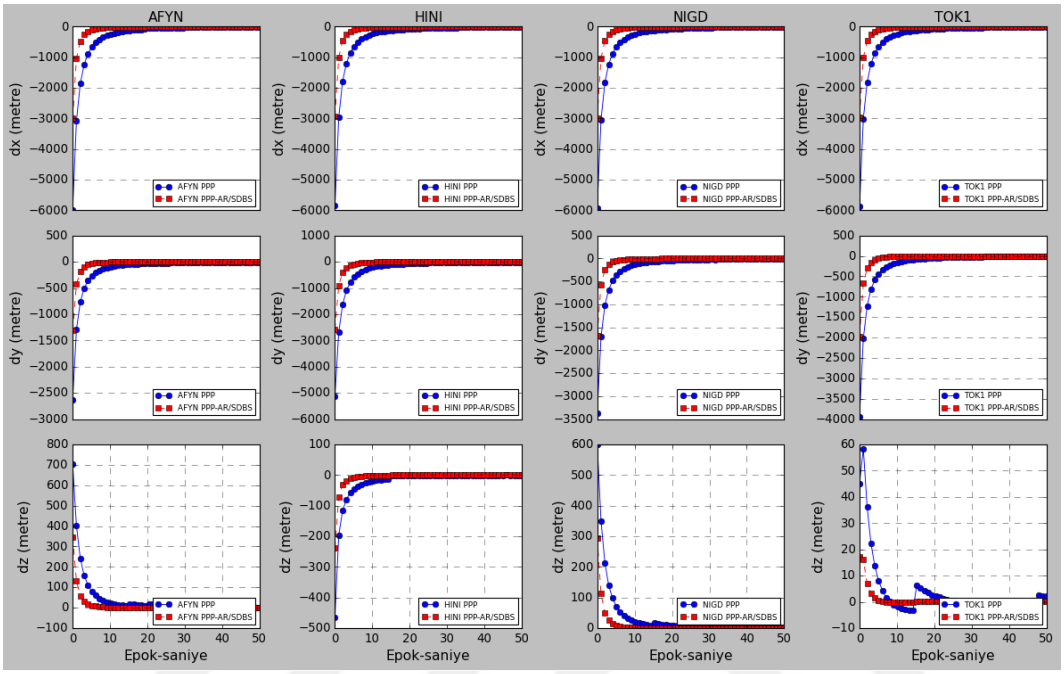

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/median
HINI PPP
HINI PPP-AR/median
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/median
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/median

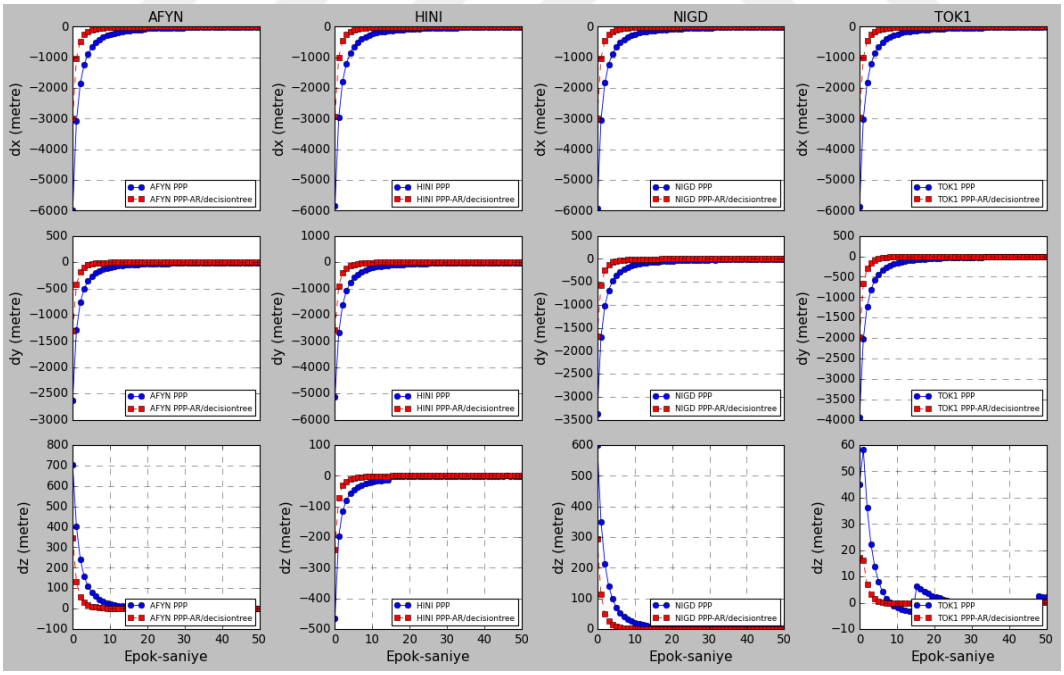

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/KNN
HINI PPP
HINI PPP-AR/KNN
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/KNN
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/KNN

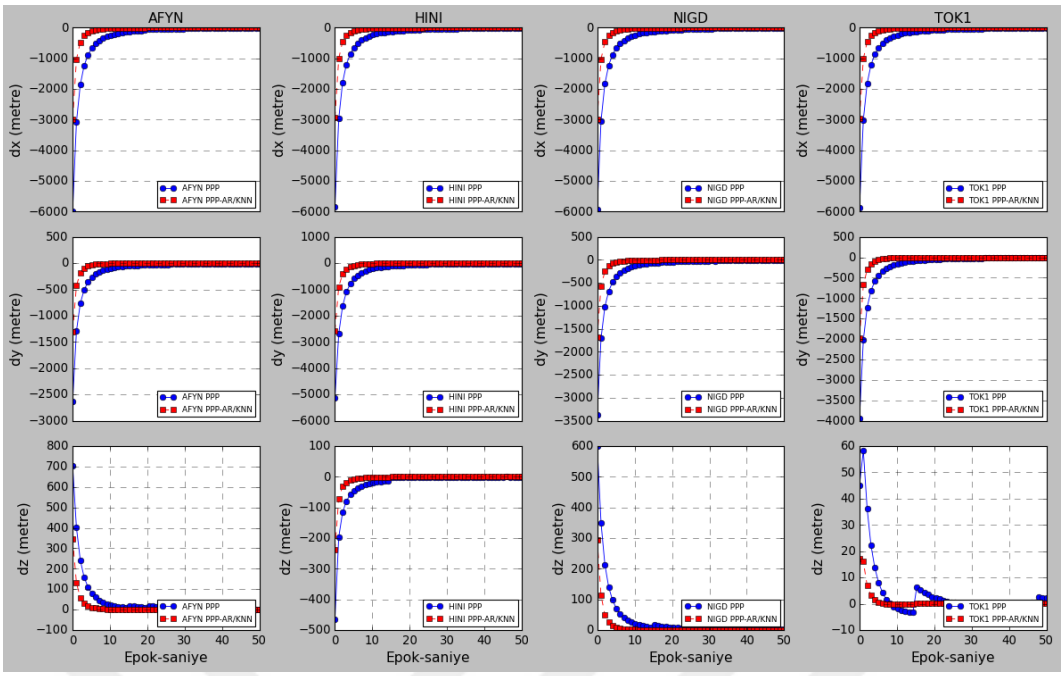

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/decisiontree
HINI PPP
HINI PPP-AR/decisiontree
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/decisiontree
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/decisiontree

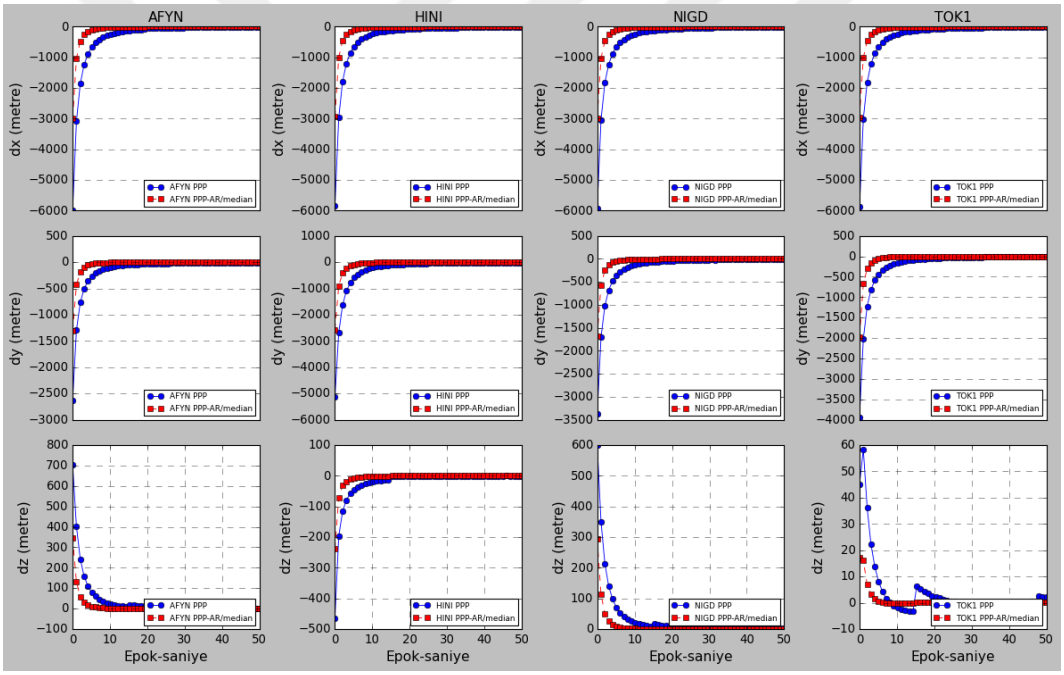

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/SDBS
HINI PPP
HINI PPP-AR/SDBS
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/SDBS
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/SDBS

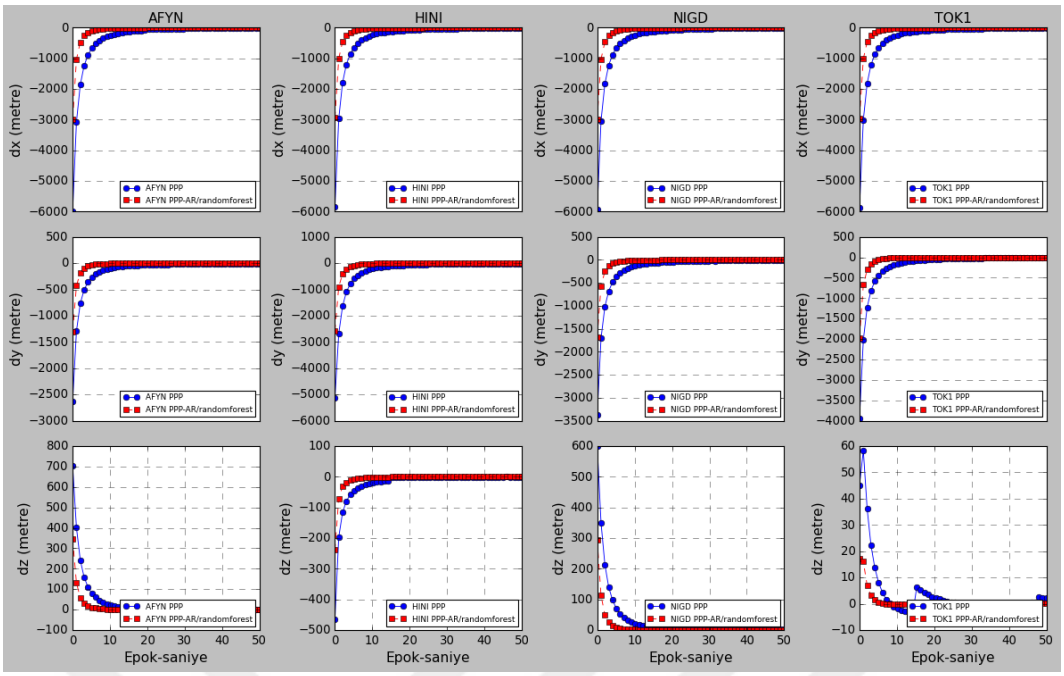
B
2022.03 GÜNÜ GRAFİKLER

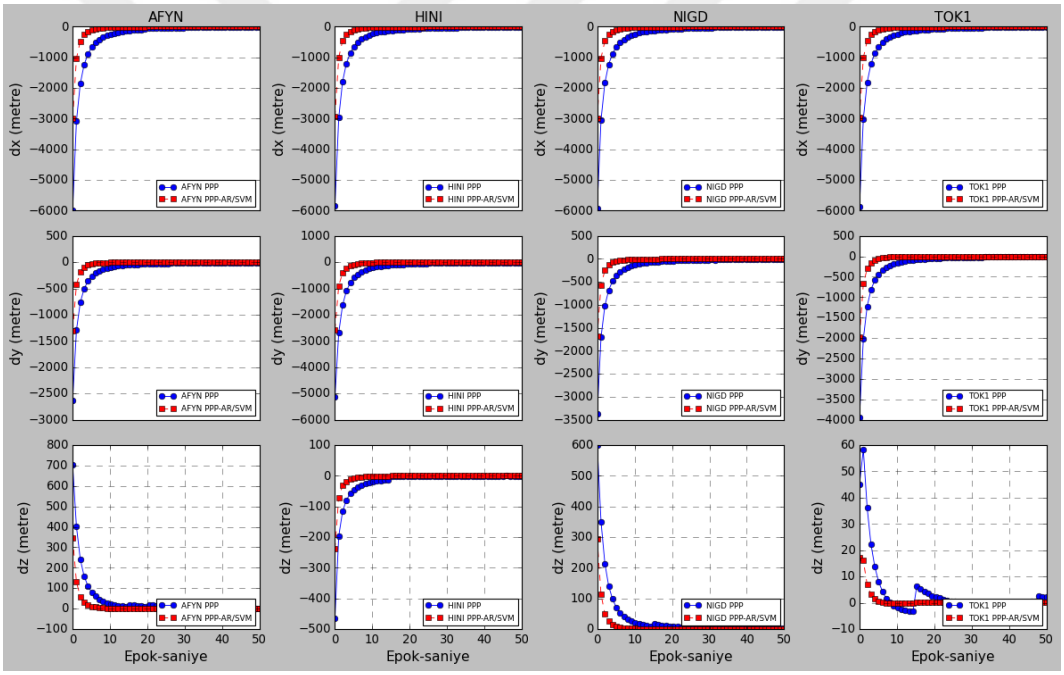




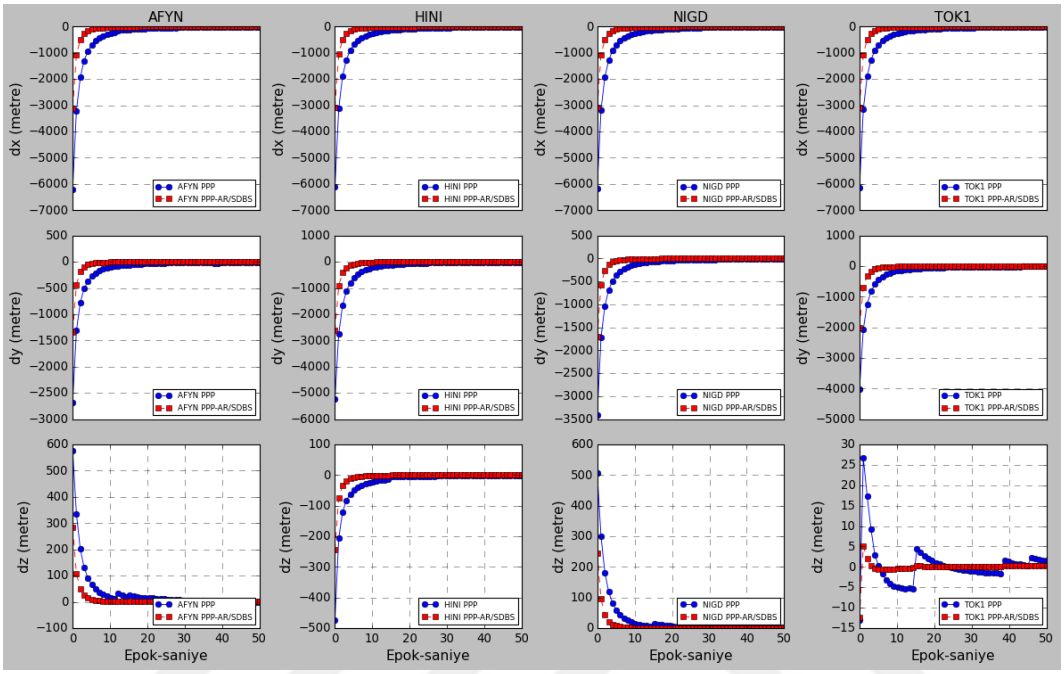

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/KNN
HINI PPP
HINI PPP-AR/KNN
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/KNN
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/KNN

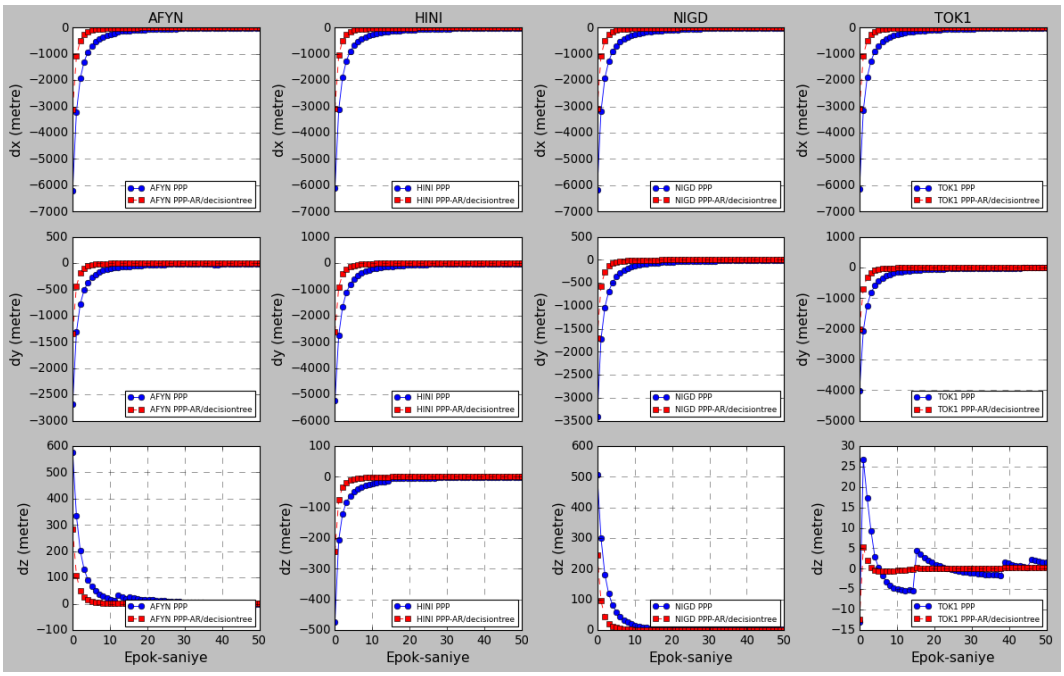

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/median
HINI PPP
HINI PPP-AR/median
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/median
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/median

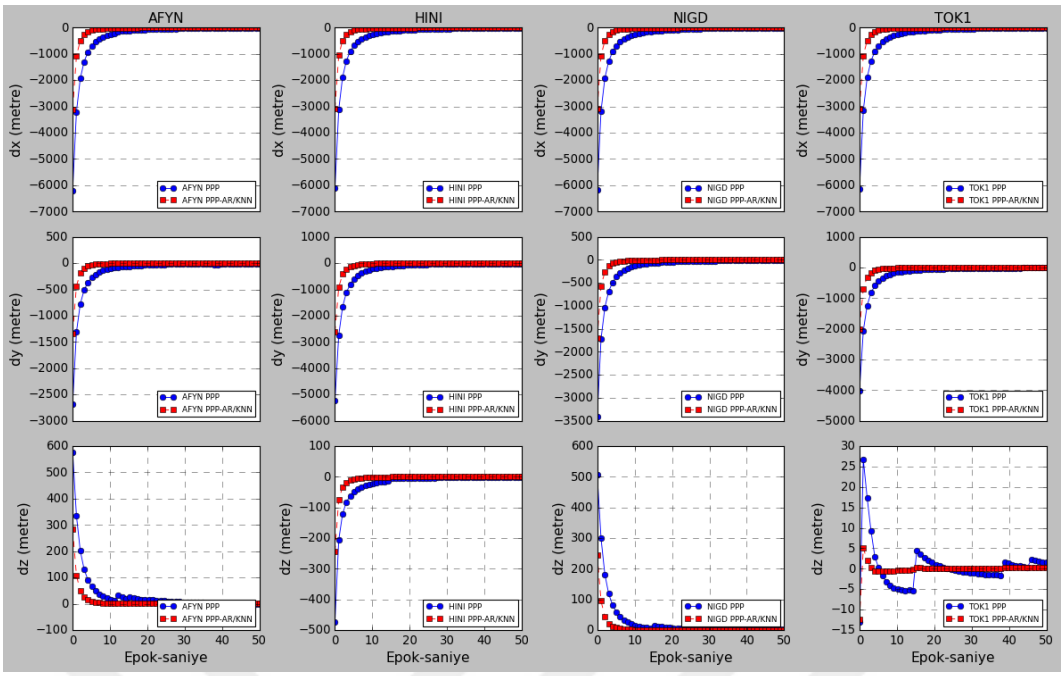

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/randomforest
HINI PPP
HINI PPP-AR/randomforest
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/randomforest
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/randomforest

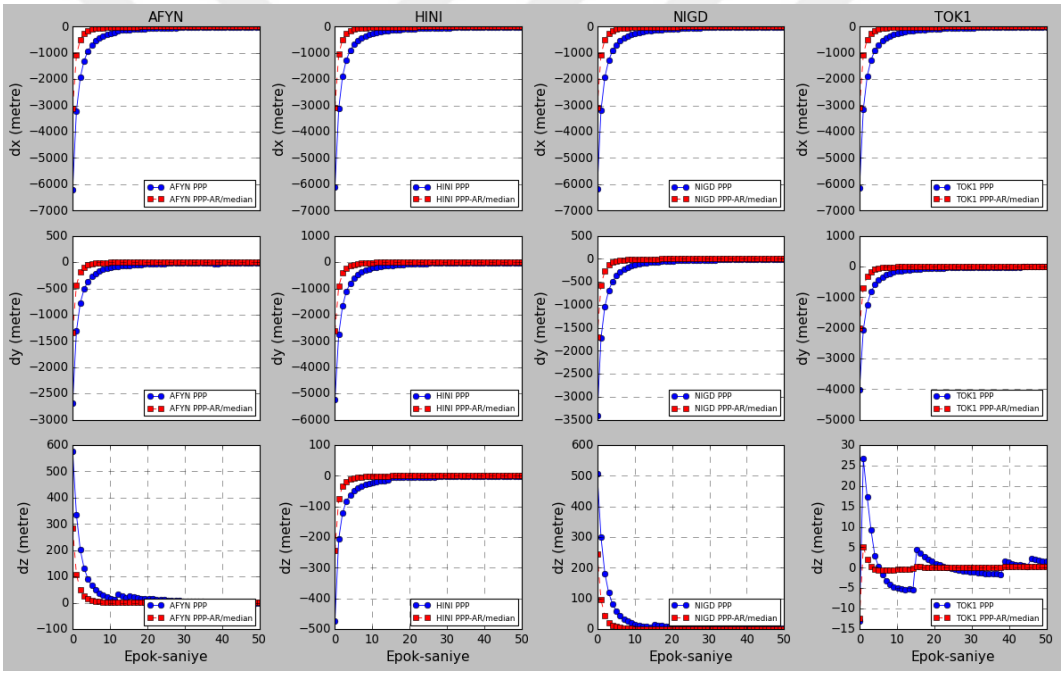

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/SVM
HINI PPP
HINI PPP-AR/SVM
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/SVM
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/SVM

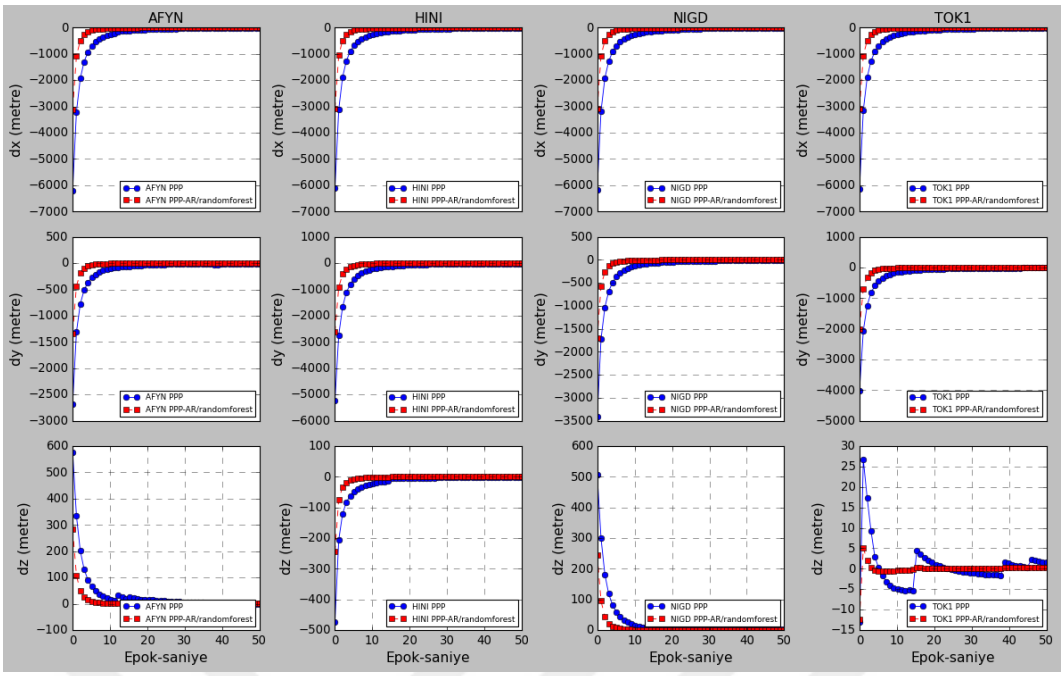
C
2022.04 GÜNÜ GRAFİKLER

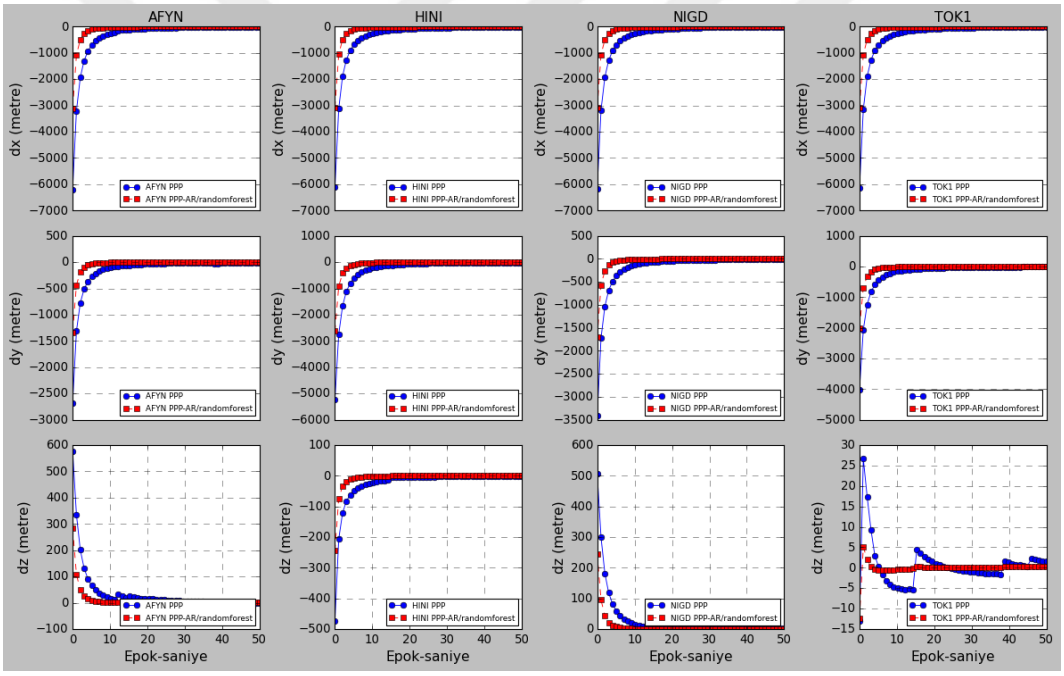




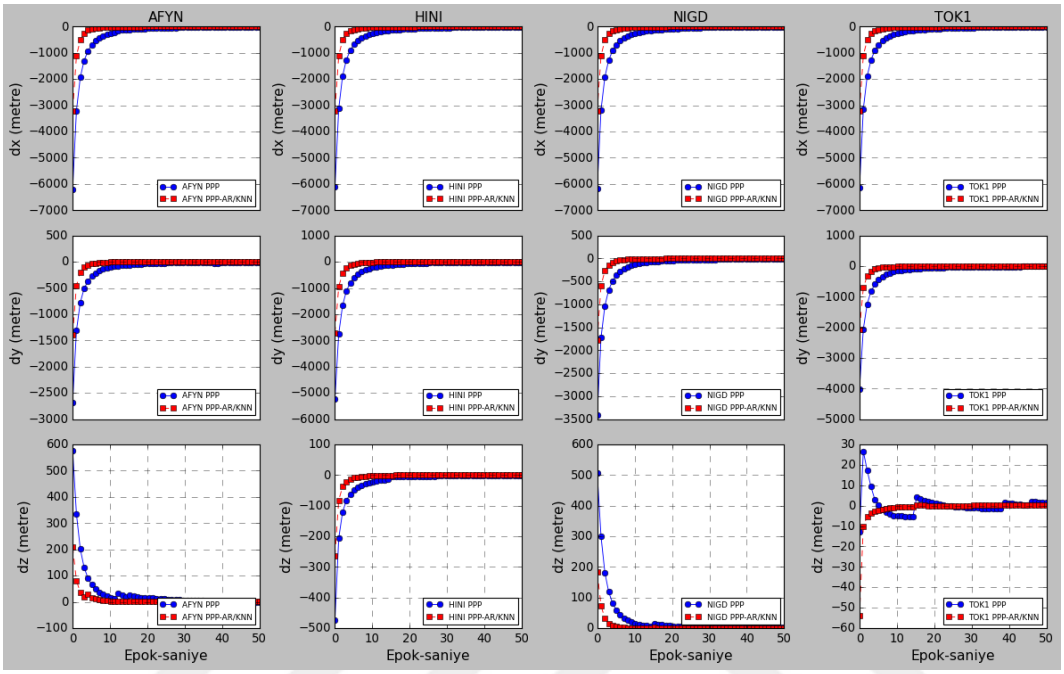

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/KNN
HINI PPP
HINI PPP-AR/KNN
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/KNN
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/KNN

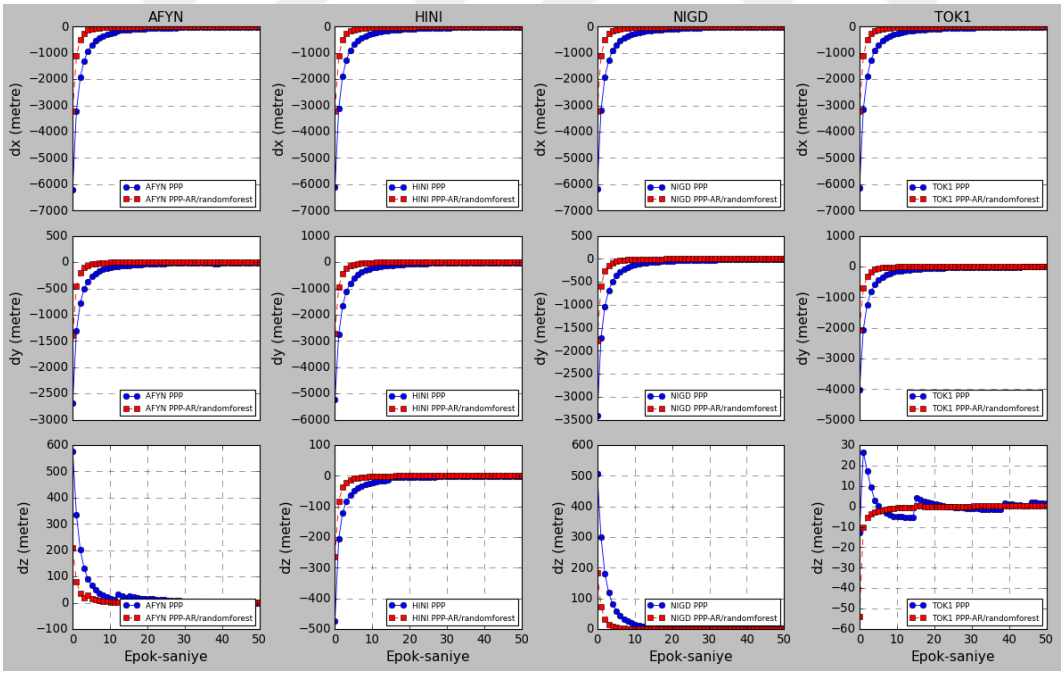

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/median
HINI PPP
HINI PPP-AR/median
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/median
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/median

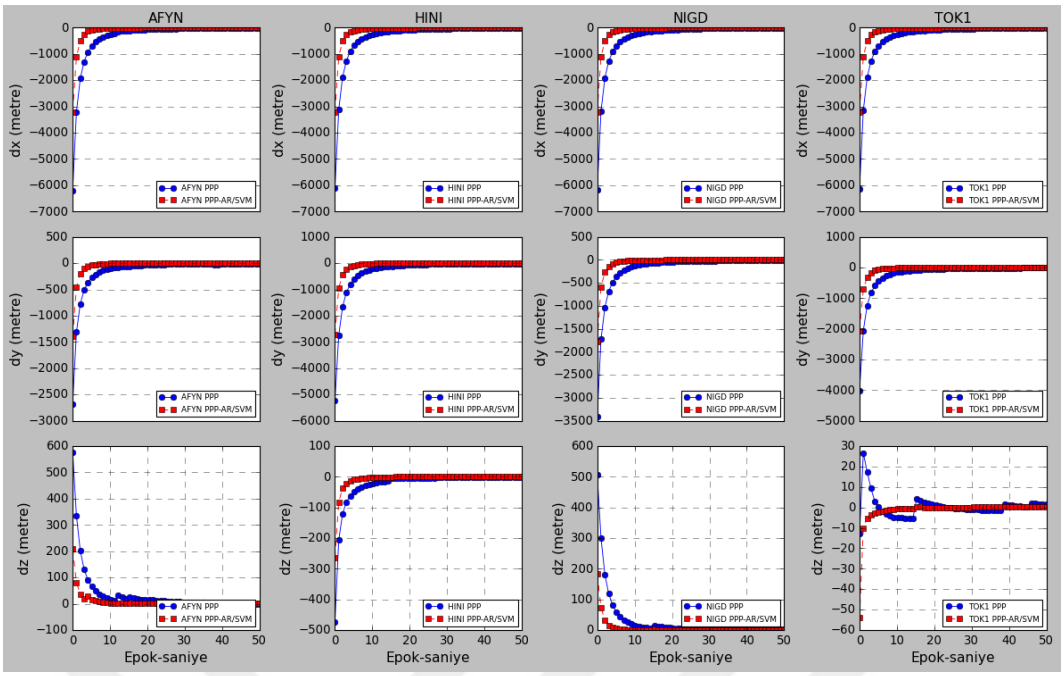

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/randomforest
HINI PPP
HINI PPP-AR/randomforest
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/randomforest
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/randomforest

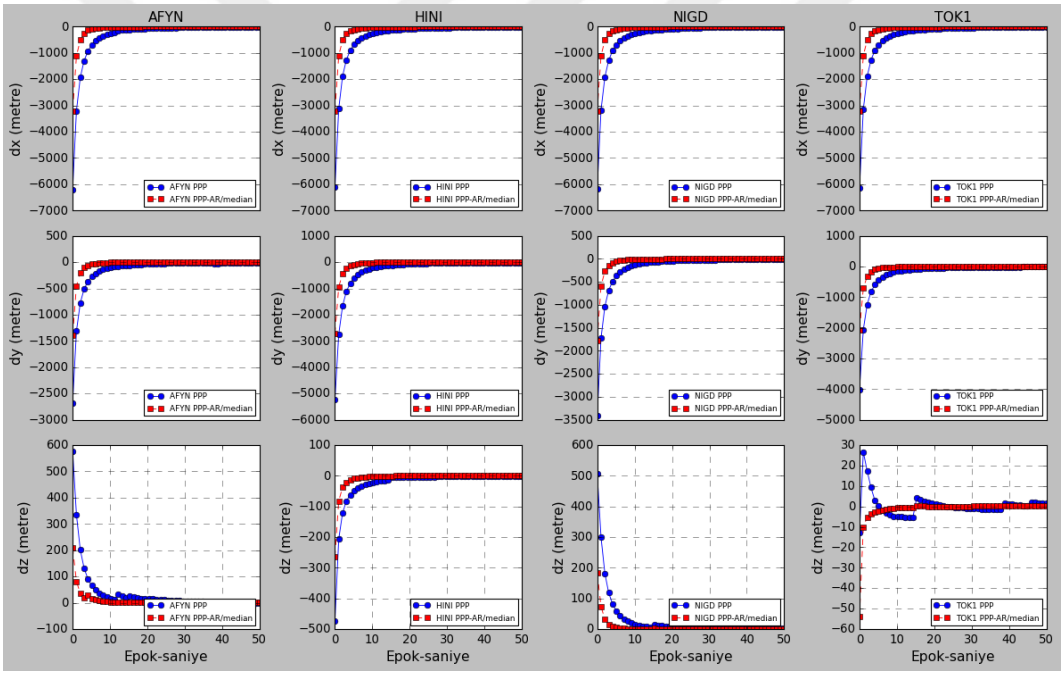

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/randomforest
HINI PPP
HINI PPP-AR/randomforest
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/randomforest
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/randomforest

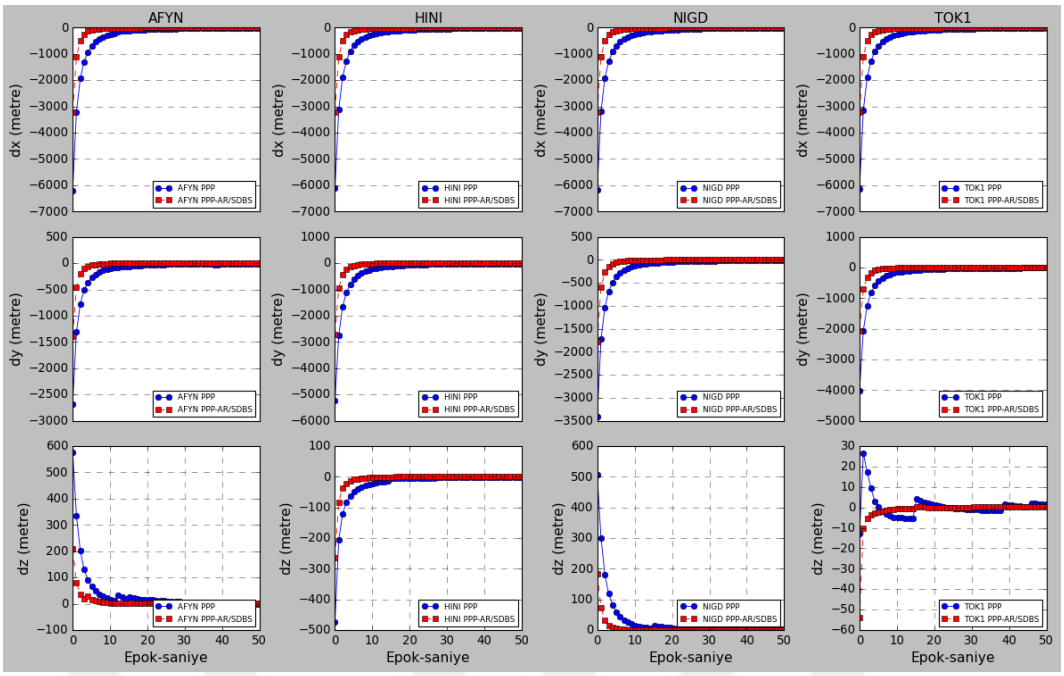
Ç
2022.05 GÜNÜ GRAFİKLER

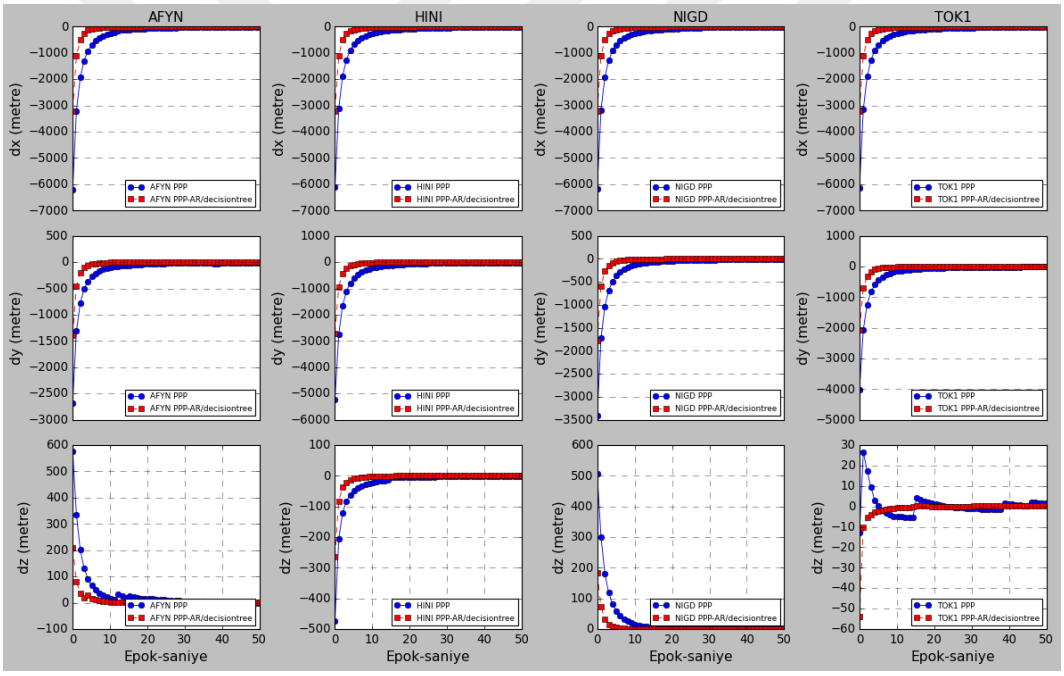




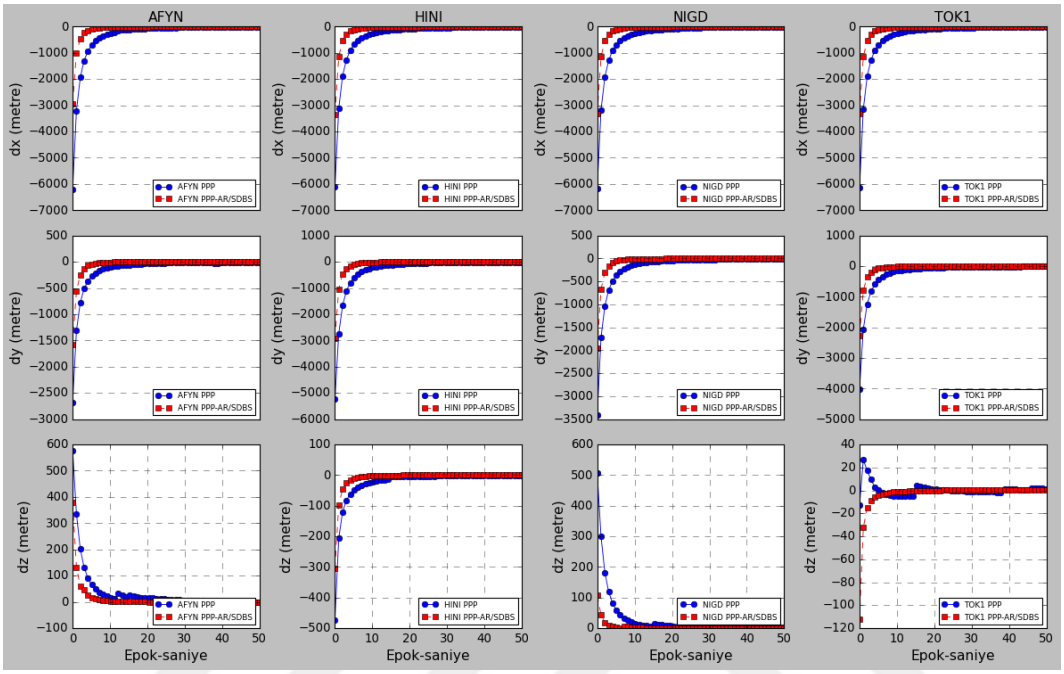

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/SVM
HINI PPP
HINI PPP-AR/SVM
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/SVM
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/SVM

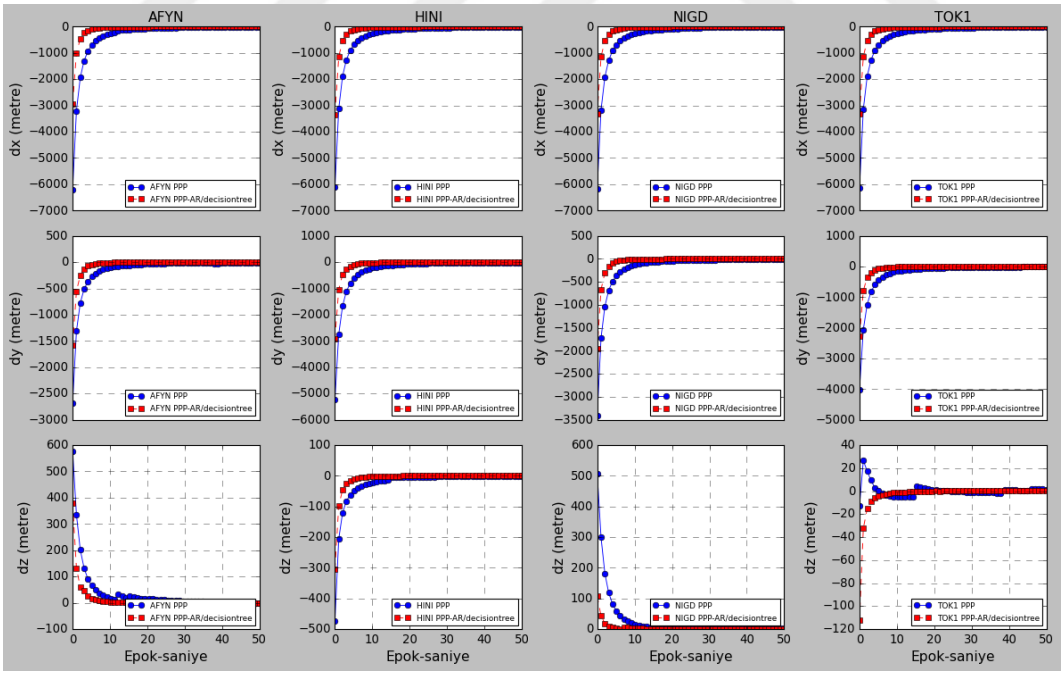

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/median
HINI PPP
HINI PPP-AR/median
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/median
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/median

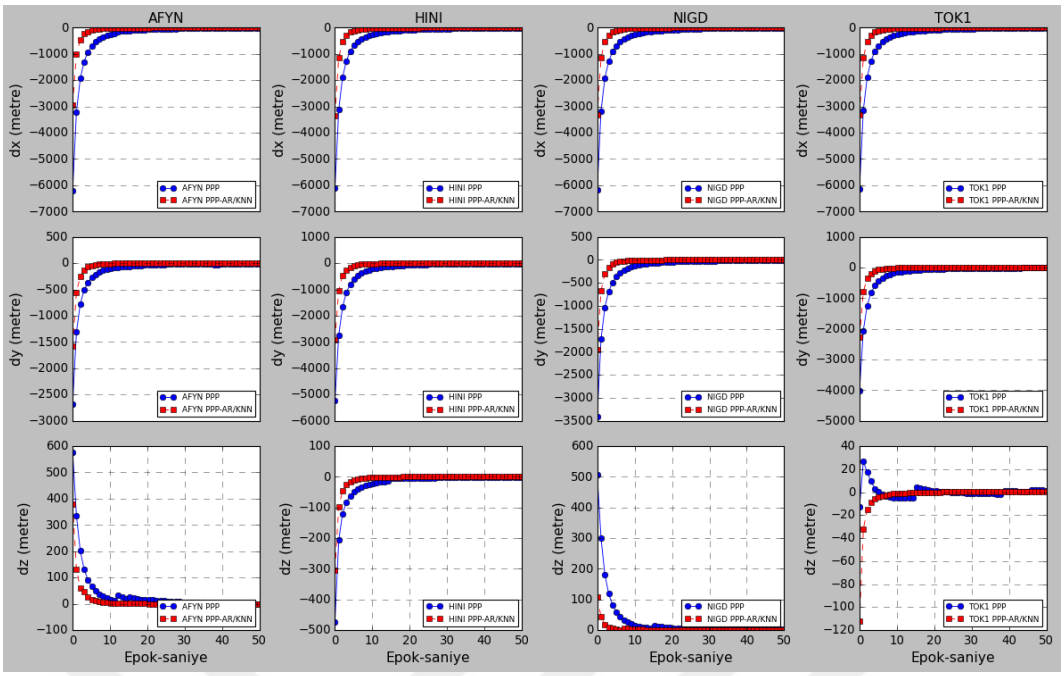

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/SDBS
HINI PPP
HINI PPP-AR/SDBS
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/SDBS
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/SDBS

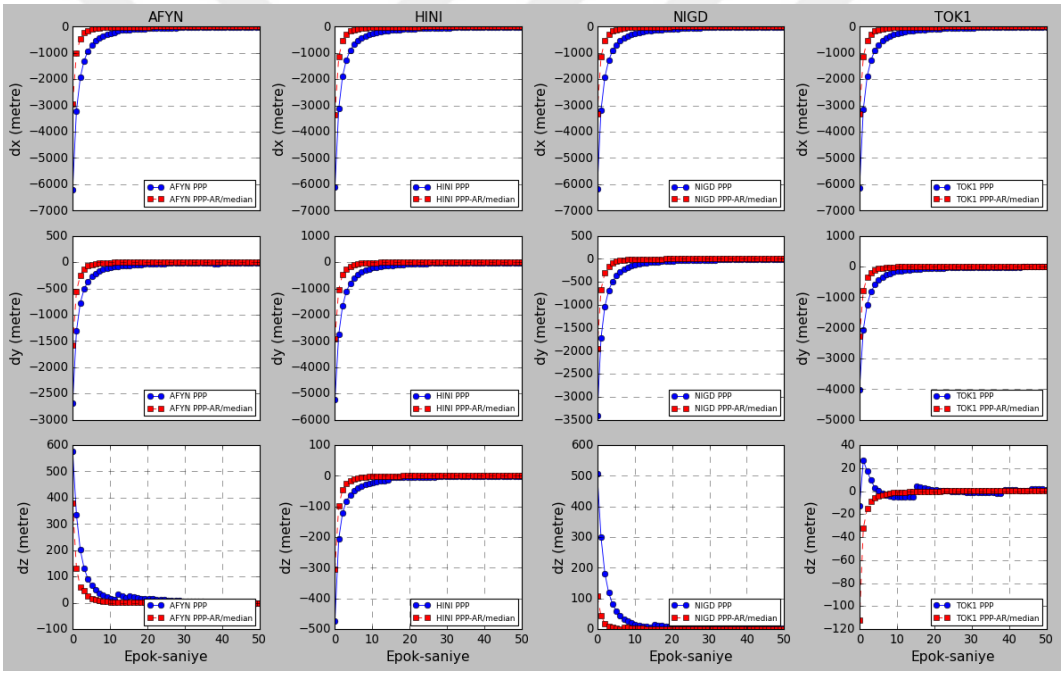

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/decisiontree
HINI PPP
HINI PPP-AR/decisiontree
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/decisiontree
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/decisiontree

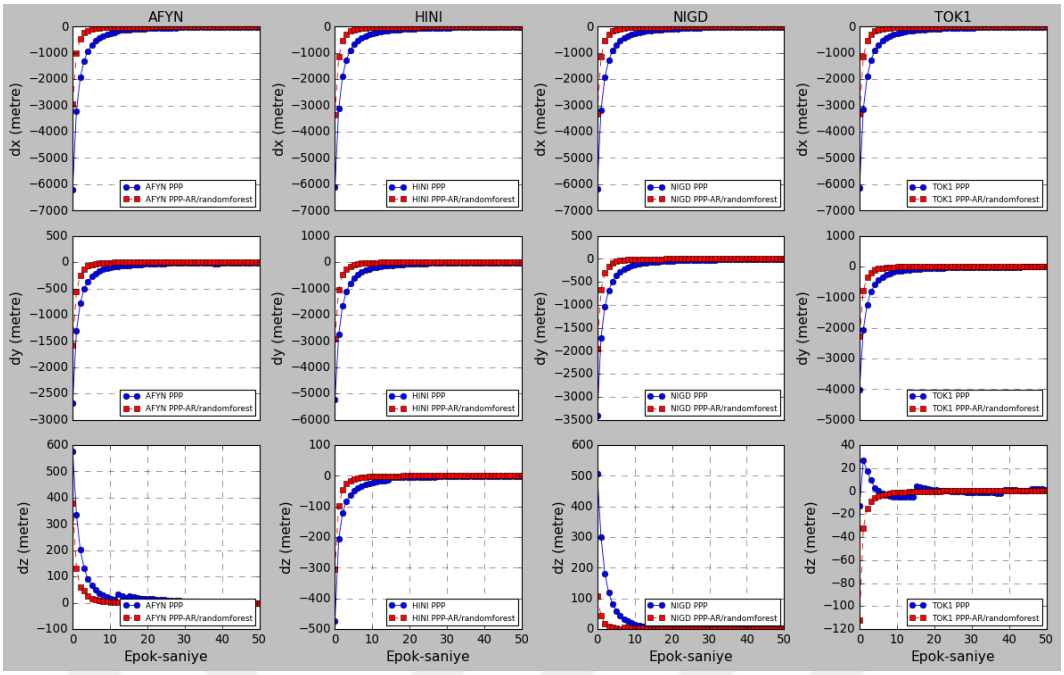
D
2022.06 GÜNÜ GRAFİKLER

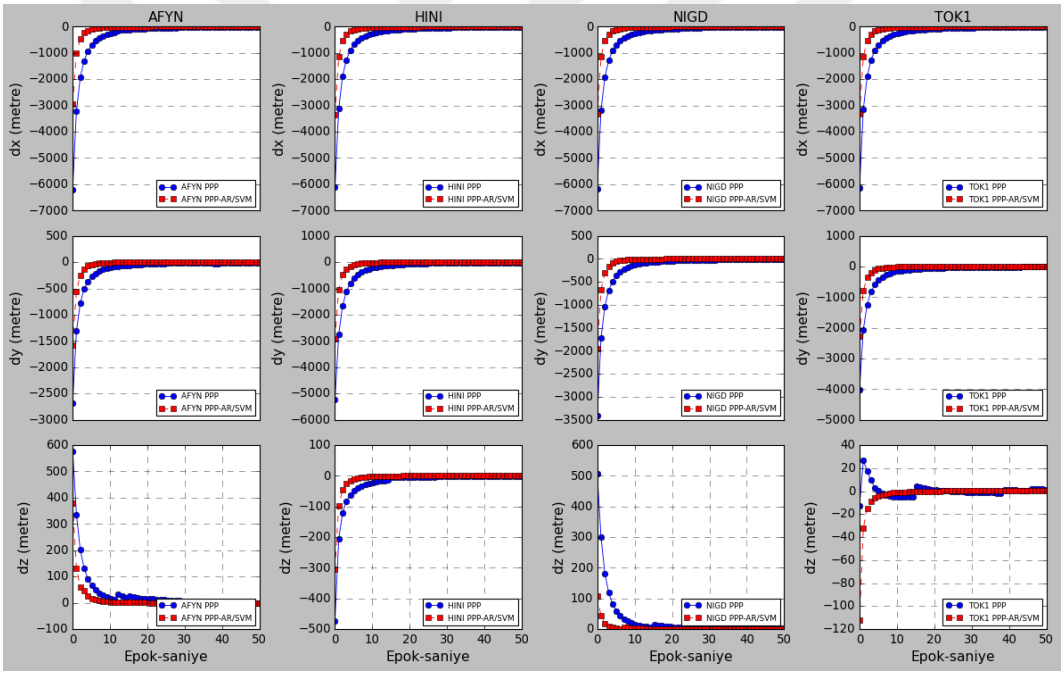




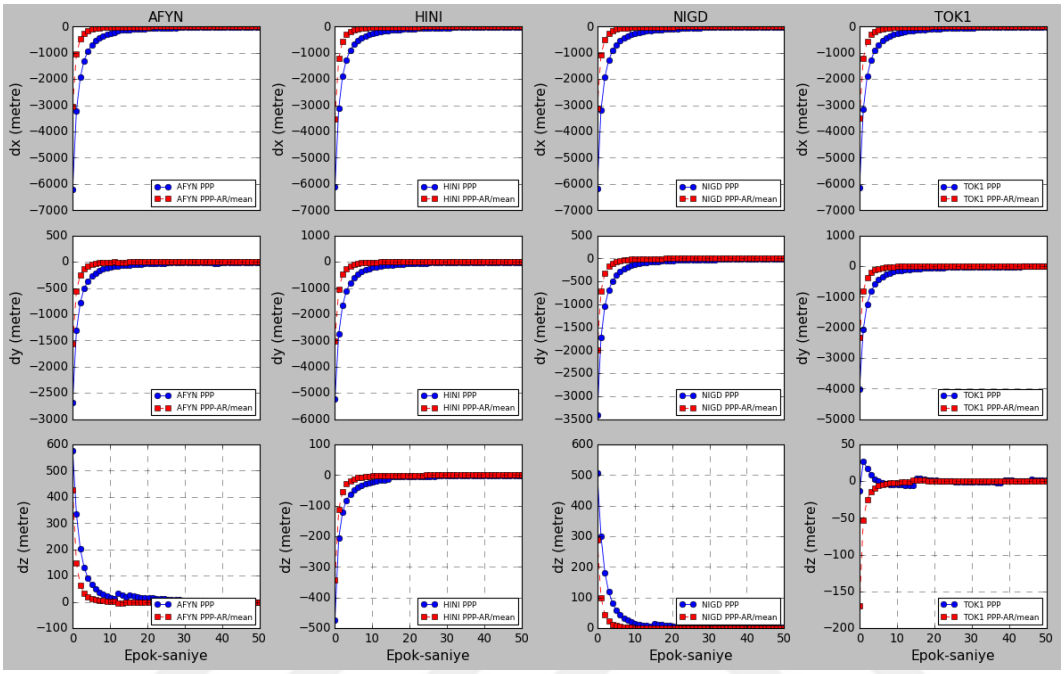

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/KNN
HINI PPP
HINI PPP-AR/KNN
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/KNN
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/KNN

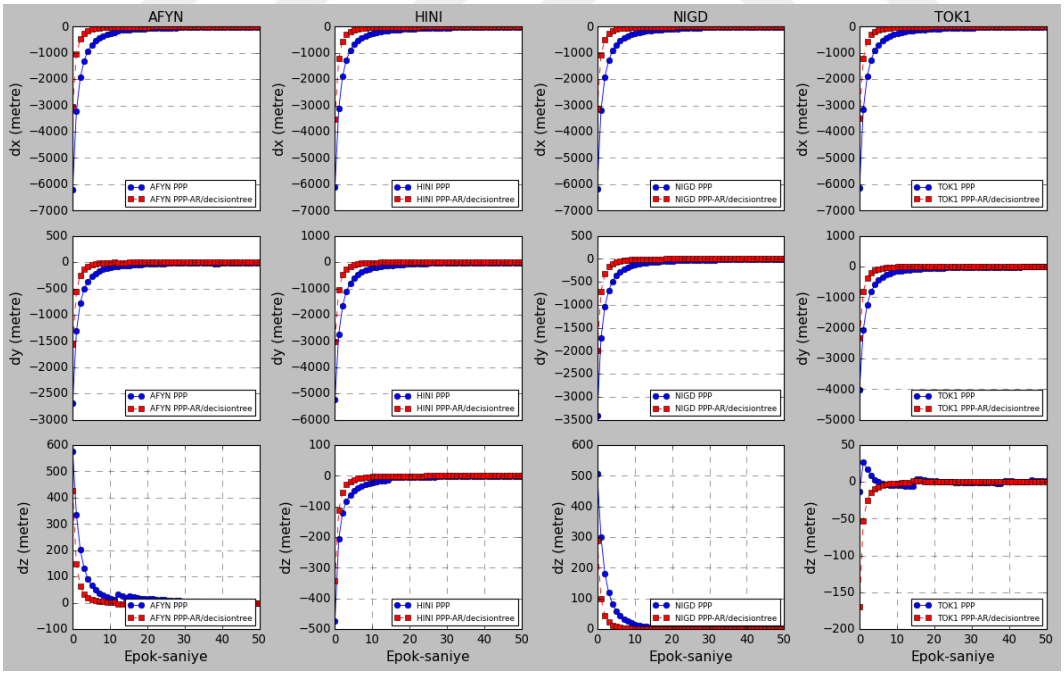

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/median
HINI PPP
HINI PPP-AR/median
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/median
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/median

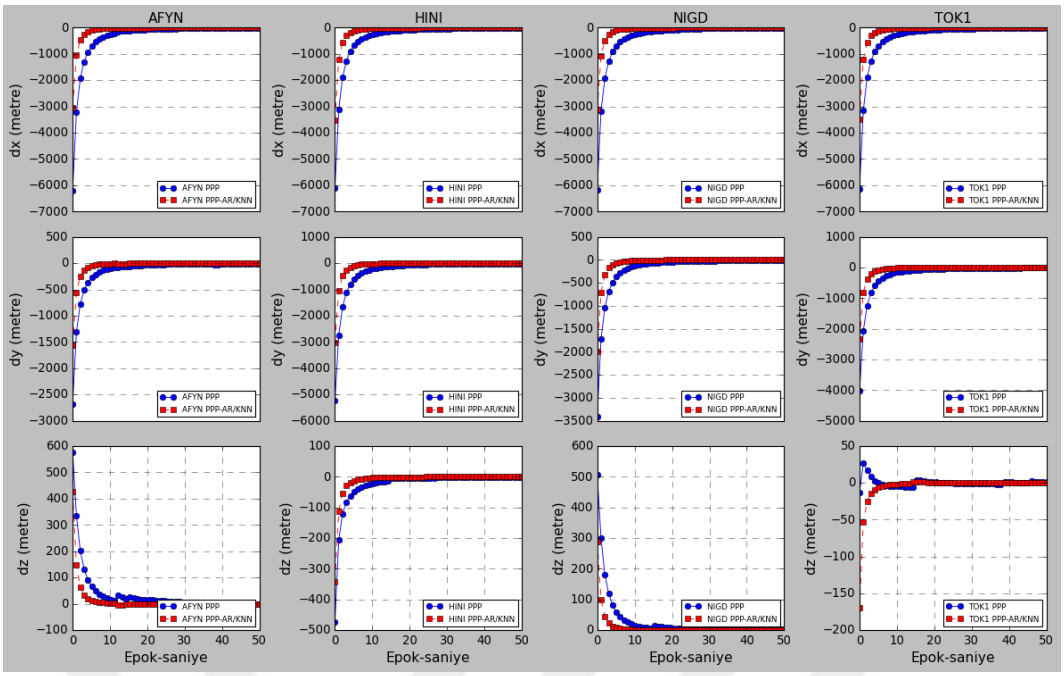

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/randomforest
HINI PPP
HINI PPP-AR/randomforest
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/randomforest
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/randomforest

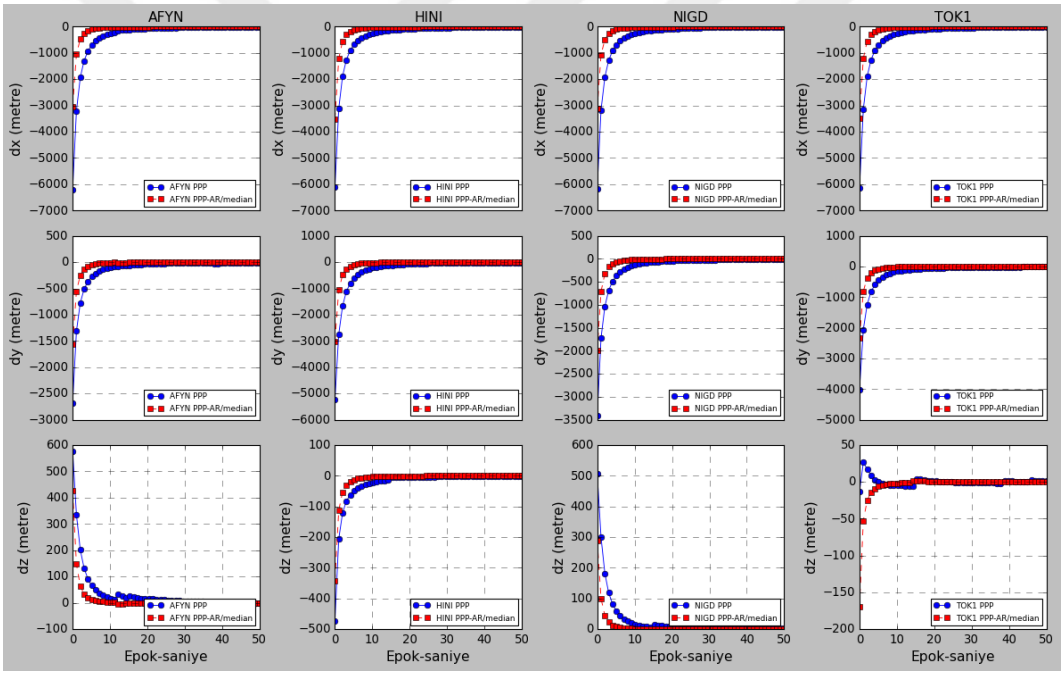

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/SVM
HINI PPP
HINI PPP-AR/SVM
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/SVM
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/SVM

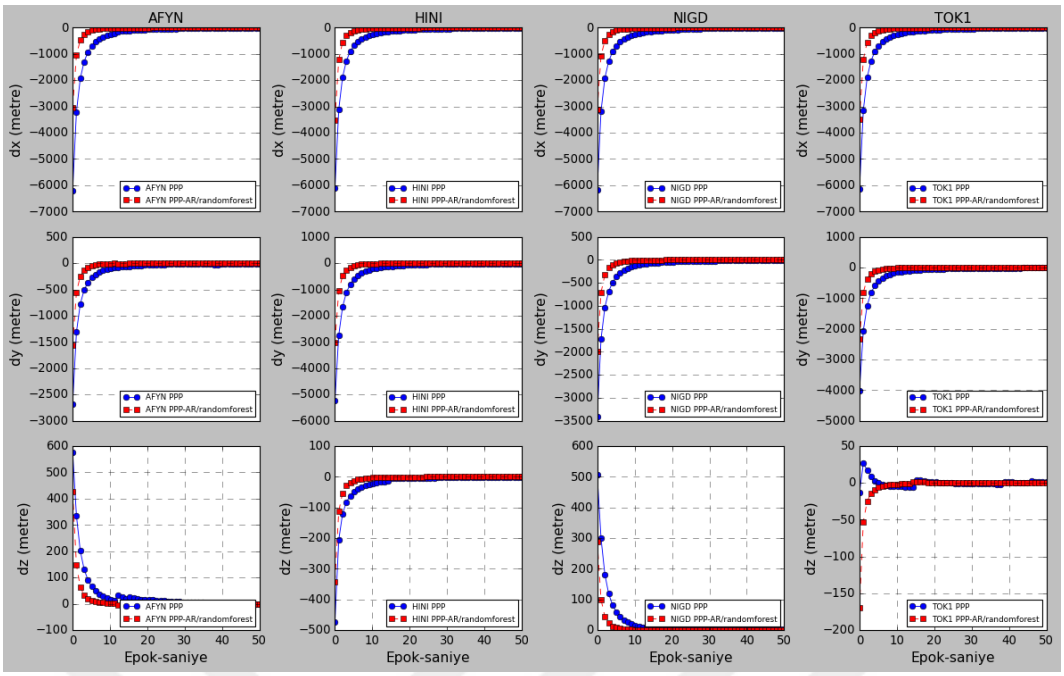
E
2022.07 GÜNÜ GRAFİKLER

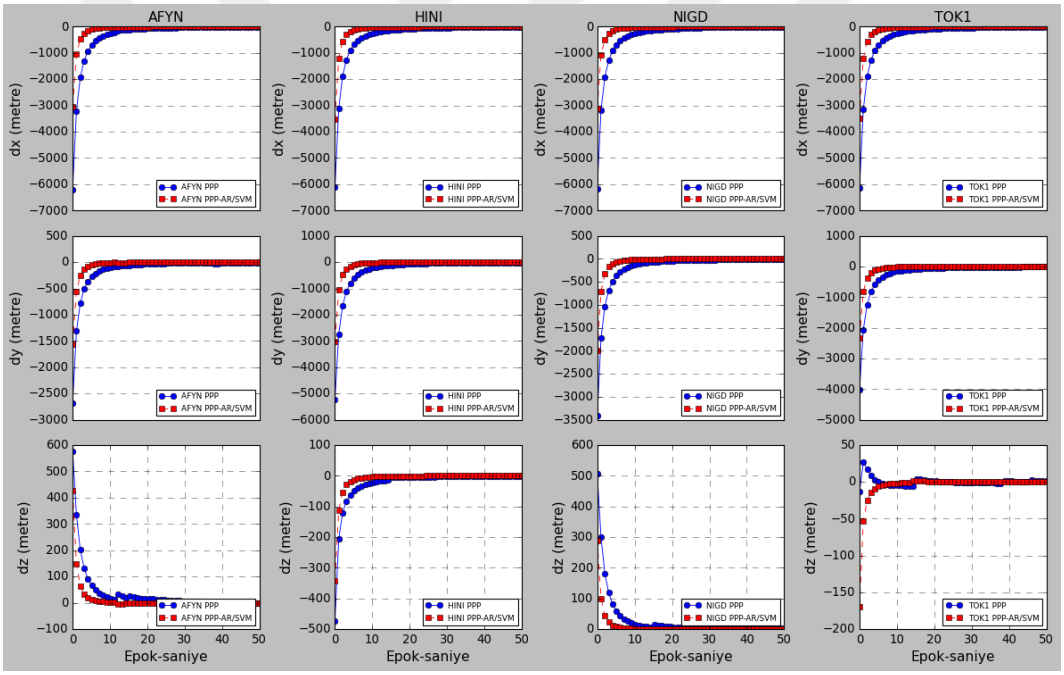




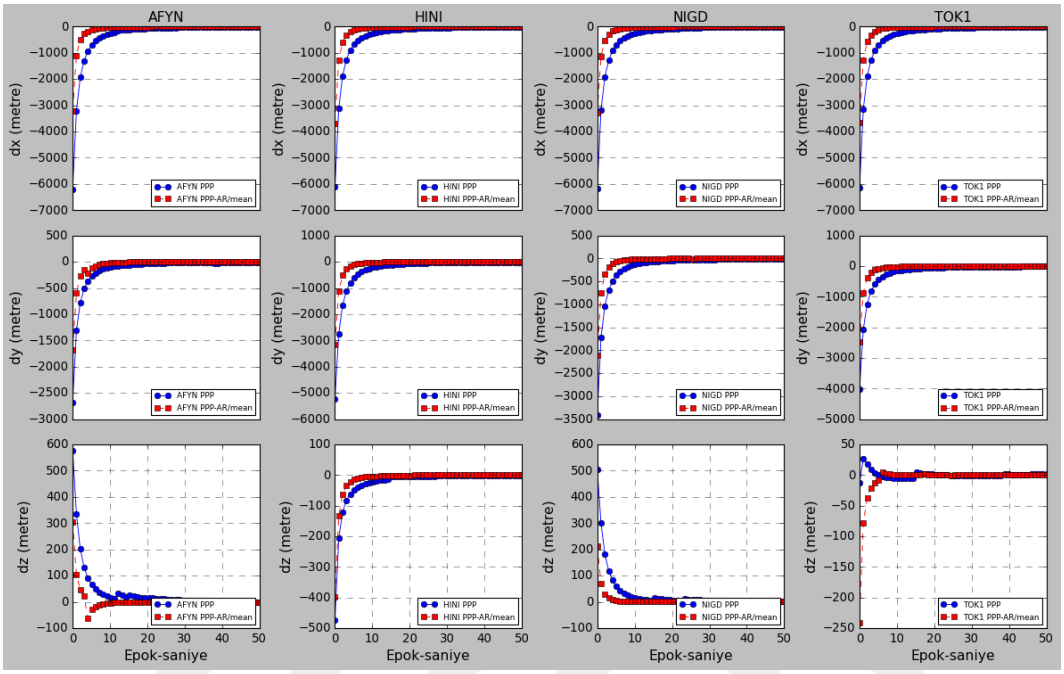

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/KNN
HINI PPP
HINI PPP-AR/KNN
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/KNN
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/KNN

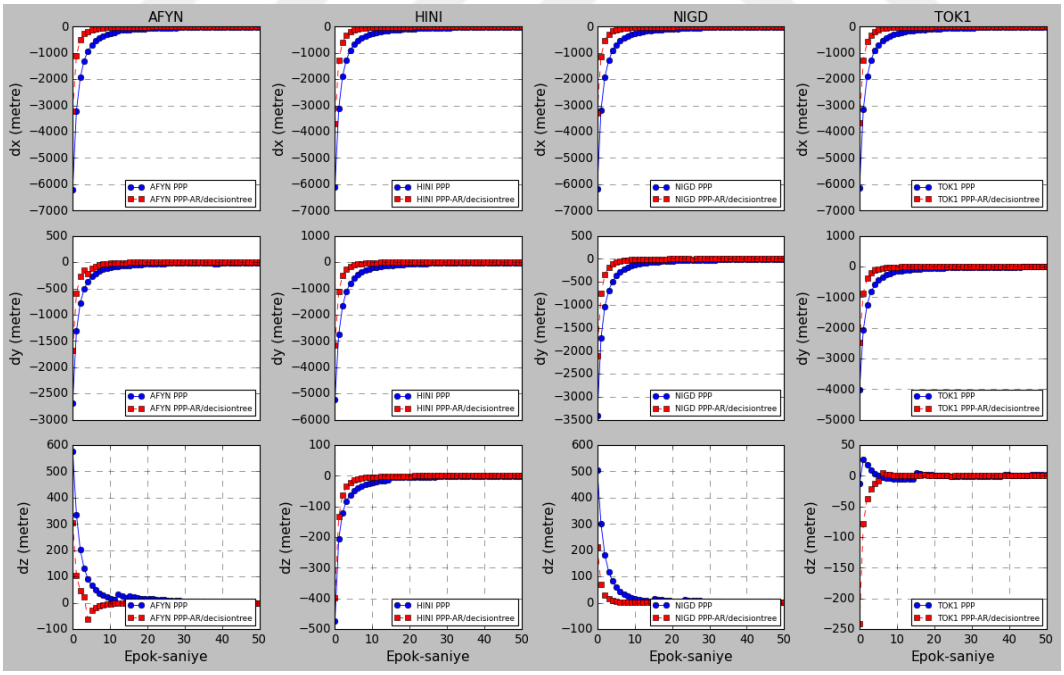

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/median
HINI PPP
HINI PPP-AR/median
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/median
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/median

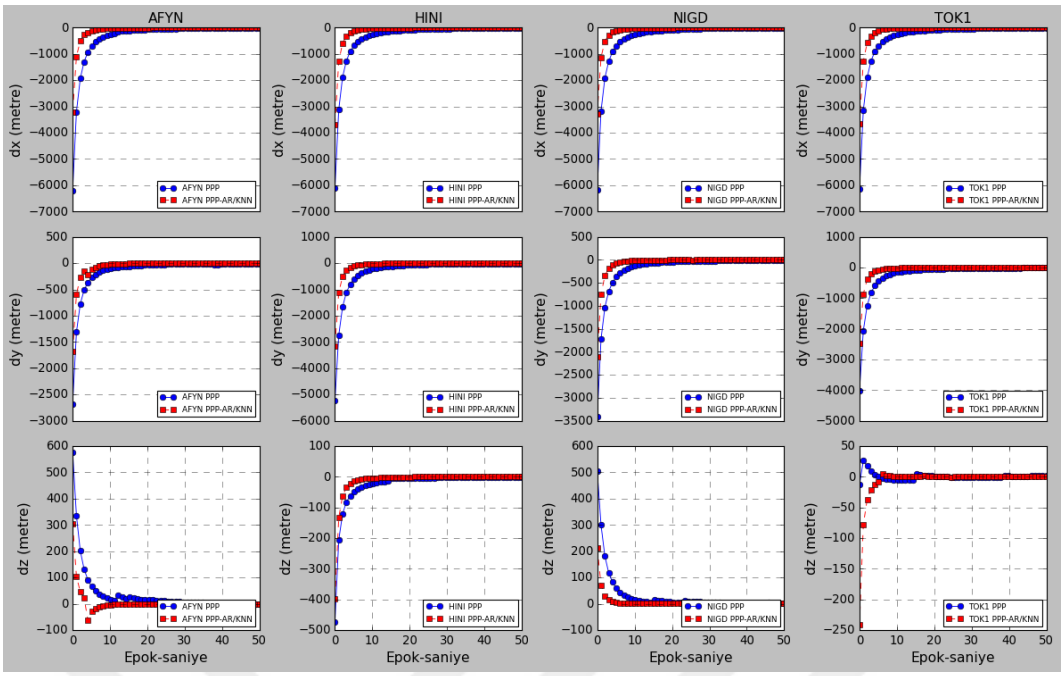

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/randomforest
HINI PPP
HINI PPP-AR/randomforest
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/randomforest
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/randomforest

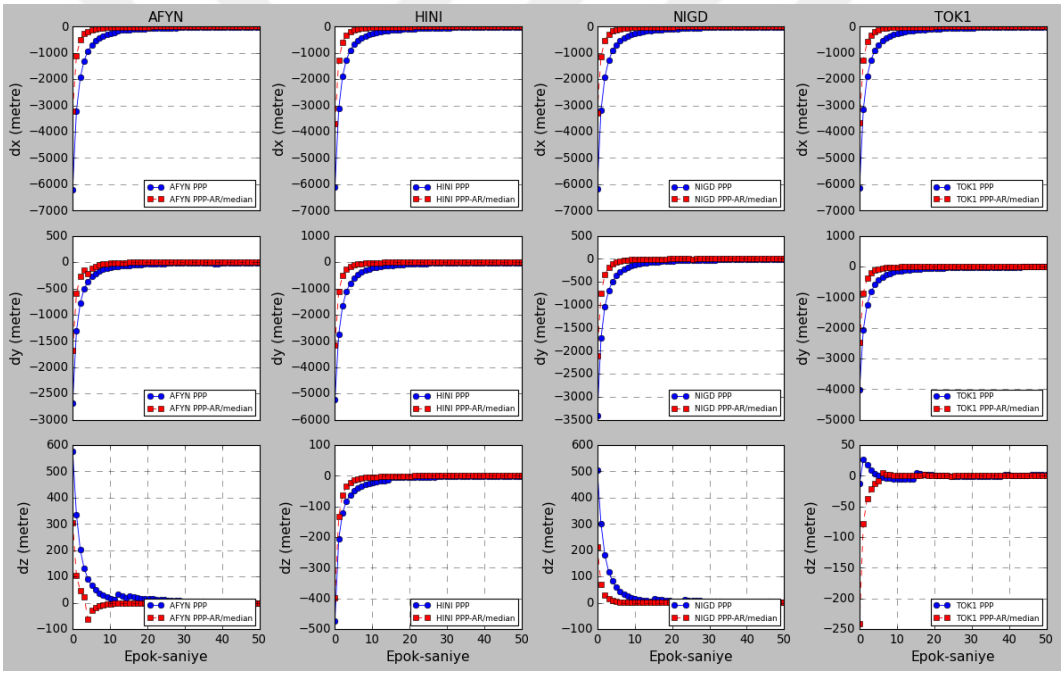

AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/SVM
HINI PPP
HINI PPP-AR/SVM
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/SVM
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/SVM

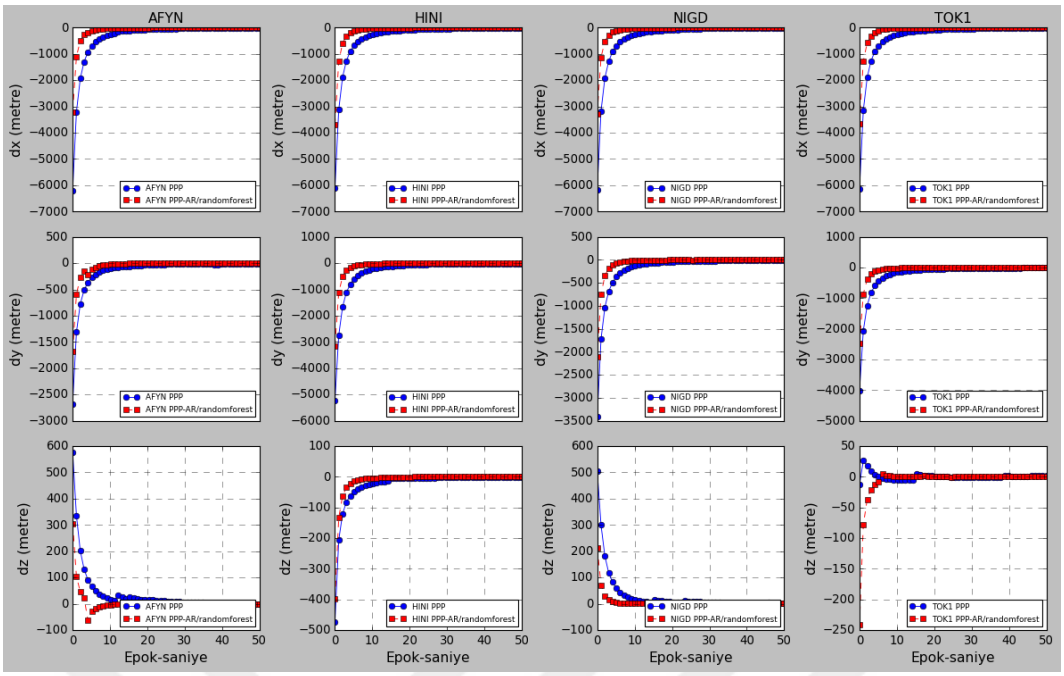
F
2022.08 GÜNÜ GRAFİKLER

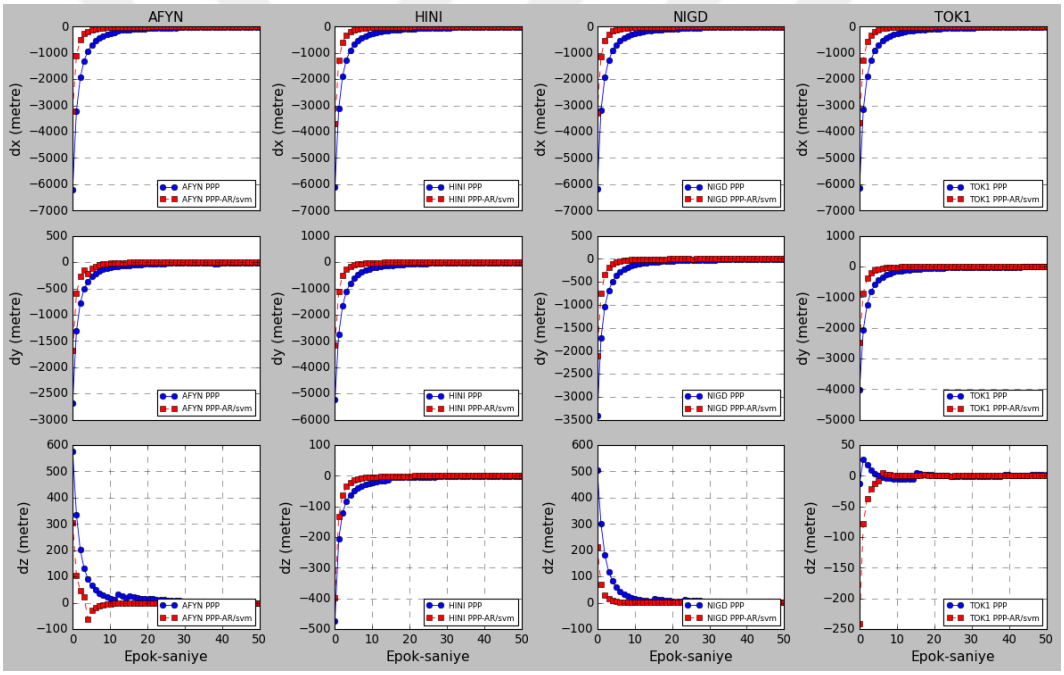





AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/KNN
HINI PPP
HINI PPP-AR/KNN
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/KNN
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/KNN


AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/median
HINI PPP
HINI PPP-AR/median
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/median
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/median


AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/randomforest
HINI PPP
HINI PPP-AR/randomforest
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/randomforest
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/randomforest


AFYN
HINI
NIGD
TOK1
dx (metre)
dy (metre)
dz (metre)
Epok-saniye
AFYN PPP
AFYN PPP-AR/svm
HINI PPP
HINI PPP-AR/svm
NIGD PPP
NIGD PPP-AR/svm
TOK1 PPP
TOK1 PPP-AR/svm

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Karlitepe F., & Erdoğan B., (2022). PPP-AR ve RT-PPP Tekniklerinin Yakınsama Süresi Üzerinden İncelenmesi. *Türkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) 2022 Yılı Bilimsel Toplantısı (Özet Bildiri)*. (Yayın No:7911620)

Makaleler

1. Karlitepe F., & Erdoğan B., (2023). Research On The Performance Of The PPP-AR Technique Under Different FCB Product Services, *Survey Review, 1-12*. Doi: 10.1080/00396265.2023.2259736 (Yayın No: 8480514)