



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



ANALİZ MERKEZLERİ UYDU SAAT
ÜRÜNLERİ FARKLARINDA ÇOKLU UYDU
YÖNTEMİ METODU PERFORMANSI

Ülkünur KORAY

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık-2024
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ülkünur KORAY tarafından hazırlanan “ANALİZ MERKEZLERİ UYDU SAAT ÜRÜNLERİ FARKLARINDA ÇOKLU UYDU YÖNTEMİ METODU PERFORMANSI” adlı tez çalışması 16/12/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Doç. Dr. Sercan BÜLBÜL

.....

Danışman

Doç. Dr. Salih Sermet ÖĞÜTCÜ

.....

Üye

Prof. Dr. Salih ALÇAY

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

Dr. Öğr. Üyesi Behlül Numan ÖZDEMİR bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ülkünur KORAY
Tarih: 16.12.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANALİZ MERKEZLERİ UYDU SAAT ÜRÜNLERİ FARKLARINDA ÇOKLU UYDU YÖNTEMİ METODU PERFORMANSI

Ülkünur KORAY

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç.Dr. Salih Sermet ÖĞÜTCÜ

2024, 43 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Salih Sermet ÖĞÜTCÜ

Prof. Dr. Salih ALÇAY

Doç. Dr. Sercan BÜLBÜL

Küresel navigasyon uydu sistemleri (GNSS) esas olarak konum belirlemek için kullanılmaktadır. Küresel navigasyon uydu sistemlerini kullanan birçok jeodezik ve navigasyon uygulamaları hassas uydu yörüngeleri ve saat ürünlerini kullanmaktadır. Uydu yörünge ve saat ürünleri analiz merkezleri tarafından yayınlanmaktadır. Uydu yörünge ve saat ürünlerinin kalitesi yapılacak uygulamaların performansı açısından önemlidir. Daha önce yapılan çalışmalarda genellikle saat ürünlerinin kalitesini değerlendirmek için tek uydu yöntemi (Single Satellite Method, SSM) benimsenmiştir. Tek uydu yönteminde bir referans uydu seçilmesi gerekir ancak bu yöntemde sonuçlar uydu seçimine göre değişeceğinden ve bazı hatalar elemine edilemeyeceğinden tek uydu yöntemi yerine tüm uyduları değerlendiren çoklu uydu yöntemi (Multiple Satellite Method, MSM) ortaya çıkmıştır. Bu tez çalışmasında GBM (GeoForschungsZentrum Potsdam) ve WUM (Wuhan University) analiz merkezlerinden 7 günlük uydu saat ürünleri elde edilmiştir. Bu iki analiz merkezinden elde edilen uydu saat ürünleri tek uydu ve çoklu uydu yöntemine göre karşılaştırılmıştır. Tüm uydular için ayrı ayrı saat doğruluğunun analizi karesel ortalama hata (KOH), hadamard varyans, uyuşumsuz ölçü oranı, Kt (frekans doğruluğu) değerleri hesaplanarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre çoklu uydu yöntemi kullanıldığı zaman iki analiz merkezi saat ürünü arasındaki standart sapmanın tek uydu yöntemine göre her zaman daha düşük olduğu ve tek uydu yöntemindeki bazı tutarsızlıkların giderildiği görülmüştür. Tek uydu yönteminde en yüksek standart sapmaya sahip olan uydunun BDS-2 uydusu olduğu, GPS ve Galileo uydularının diğer uydulara göre standart sapma değerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Uydu saat ürünlerinin doğruluklarına bakıldığında karesel ortalama hata değerinin en yüksek GLONASS uydularında, en düşük Galileo uydularında olduğu, hadamard varyansın ise en yüksek GLONASS uydularında olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çoklu uydu yöntemi, Hadamard varyans, KOH, saat ürünü, tek uydu yöntemi

ABSTRACT

MS THESIS

ANALYSIS CENTERS SATELLITE CLOCK PRODUCTS DIFFERENCES MULTI-SATELLITE METHOD PERFORMANCE

Ülkünur KORAY

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN GEOMATICS ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Salih Sermet ÖĞÜTÇÜ

2024, 43 Pages

Jury

Doç. Dr. Salih Sermet ÖĞÜTÇÜ
Prof. Dr. Salih ALÇAY
Doç. Dr. Sercan BÜLBÜL

GNSS are mainly used for position determination. Many geodetic and navigation applications using GNSS use precise satellite orbits and clock products. Satellite orbit and clock products are published by analysis centers. The quality of satellite orbit and clock products is important for the performance of the applications to be performed. In previous studies, single satellite method (SSM) has generally been adopted to evaluate the quality of clock products. In single satellite method, a reference satellite should be selected, but since the results in this method will vary according to the satellite selection and some errors cannot be eliminated, multi-satellite method (MSM) that evaluates all satellites has emerged instead of single satellite method. In this thesis, 7-day satellite clock products were obtained from GBM (GeoForschungsZentrum Potsdam) and WUM (Wuhan University) analysis centers. Satellite clock products obtained from these two analysis centers were compared according to single satellite and multi-satellite methods. Analysis of clock accuracy for all satellites separately was made by calculating root mean square error (KOH), hadamard variance, mismatch measurement ratio, Kt (frequency accuracy) values. According to the results obtained, it was observed that when the multi-satellite method was used, the standard deviation between the two satellite clock products was always lower than the single-satellite method and some inconsistencies in the single-satellite method were eliminated. It was observed that the satellite with the highest standard deviation in the single-satellite method was the BDS-2 satellite, and that the standard deviation value of the GPS and Galileo satellites was lower than the other satellites. When the accuracies of the satellite clock products were examined, it was concluded that the highest root mean square error was in the GLONASS satellites, the lowest in the Galileo satellites, and the hadamard variance was the highest in the GLONASS satellites.

Keywords: Multi-satellite method, Hadamard variance, KOH, hour product, single satellite method

ÖNSÖZ

Öncellikle bana her konuda yol gösteren, lisans ve yüksek lisans eğitimim boyunca desteğini, bilgisini esirgemeyen ve benim kendime inanmamı sağlayan çok kıymetli danışman hocam sayın Doç. Dr. Salih Sermet ÖĞÜTCÜ hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Eş danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Behlül Numan ÖZDEMİR hocama tez çalışmama katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim boyunca önerileri ve fikirleri ile bana yol gösteren sayın Prof. Dr. Salih ALÇAY hocama, Doç. Dr. İlkey BUĞDAYCI hocama, ve Arş. Gör. Tansu ALKAN hocama teşekkürlerimi sunarım.

Bu süreçte her zaman yanımda olan başta canım kardeşim Bilge Nur KORAY'a, anneme ve babama sonsuz teşekkür ederim. Beni her zaman motive eden, her konuda destekleyen arkadaşlarım Ayşenur GÜZEL' e ve Mustafa HALİK'e teşekkür ederim.

Ülkünur KORAY
KONYA-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	iv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tez Düzeni	4
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	6
3. ULUSLARARASI GNSS SERVİSİ (INTERNATIONAL GNSS SERVICE-IGS)	10
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	23
5.1. Tek Uydu Yöntemi	23
5.2. Tek Uydu Yönteminde Referans Uydu Seçimi İçin Araştırılan Kriterler	26
5.2.1. Karesel Ortalama Hata.....	26
5.2.2. Hadamard Sapması	30
5.2.3. Uyuşumsuz Ölçü Oranı.....	33
5.2.4. Karesel Ortalama Hata ve Hadamard Sapması Karşılaştırması.....	35
5.3. Çoklu Uydu Yöntemi.....	35
6. SONUÇLAR	37
7. KAYNAKLAR	38

SİMGELER VE KISALTMALAR

AC: Analysis Centre
BEIDOU: Chinese Global Navigation Satellite System
BKG: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
CDDIS: Crustal Dynamics Data Information System
CNES: Centre National d'Etudes Spatiales
CODE: Center for Orbit Determination in Europe
DLR: Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
ECEF: Earth Centered-Earth Fixed
ESA/ESOC: European Space Agency's Space Operations Centre (IGS AC).
GALILEO: European Global Navigation Satellite System
GFZ: GeoForschungsZentrum
GLONASS: Russian Globalnaya Navigazionnaya Sputnikovaya Sistema
GMV: GMV Aerospace and Defense
GNSS: Global Navigation Satellite System
GPS: Global Position System
IAG: International Association of Geodesy
IGS: International GNSS Service
ITRF: International Terrestrial Reference Frame
JPL: Jet Propulsion Laboratory USA (IGS AC)
MADOC: Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis
MGEX: Multi-GNSS Experiment
NRCan: Natural Resources Canada, Canada (IGS AC)
PPP: Precise Point Positioning
RTCM: Radio Technical Commission for Maritime Services
RTS: Real Time Service
SP3: Standard Product
WUM: Wuhan University, China (MGEX AC)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. GBM analiz merkezinden elde edilen bir saat dosyasının başlık bölümü.....	3
Şekil 3.1. IGS izleme istasyonları ağı (URL 3).....	11
Şekil 4.1. CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) internet sayfasının görünümü.....	16
Şekil 4.2. GNSS_PRODUCTS_DIFF yazılımının arayüzü	17
Şekil 4.3. GNSS_PRODUCTS_DIFF yazılımından elde edilen bir sonuç dosyası örneği	18
Şekil 4.4. Tek uydu yönteminin akış şeması	19
Şekil 4.5. Çoklu uydu yönteminin akış şeması.....	20
Şekil 5.1. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için GPS saat farklarının ortalama standart sapması.....	23
Şekil 5.2. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için Galileo saat farklarının ortalama standart sapması.....	24
Şekil 5.3. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için GLONASS saat farklarının ortalama standart sapması.....	24
Şekil 5.4. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için BDS-2 saat farklarının ortalama standart sapması.....	25
Şekil 5.5. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için BDS-3 saat farklarının ortalama standart sapması.....	25
Şekil 5.6. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için GPS uydu saatlerinin karesel ortalama hata değerleri.....	26
Şekil 5.7. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için Galileo uydu saatlerinin karesel ortalama hata değerleri	27
Şekil 5.8. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için GLONASS uydu saatlerinin karesel ortalama hata değerleri	27
Şekil 5.9. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için BDS-2 uydu saatlerinin karesel ortalama hata değerleri	28
Şekil 5.10. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için BDS-3 uydu saatlerinin karesel ortalama hata değerleri	28
Şekil 5.11. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için GPS uydularının hadamard sapmaları.....	30
Şekil 5.12. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için Galileo uyduların hadamard sapmaları.....	31
Şekil 5.13. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için GLONASS uydularının hadamard sapmaları	31
Şekil 5.14. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için BDS-2 uydularının hadamard sapmaları	32
Şekil 5.15. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için BDS-3 uydularının hadamard sapmaları	32
Şekil 5.16. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli güne ait GPS uydu saatlerinin uyuşumsuz ölçü oranı	33
Şekil 5.17. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli güne ait Galileo uydu saatlerinin uyuşumsuz ölçü oranı	34
Şekil 5.18. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli güne ait BDS-3 uydu saatlerinin uyuşumsuz ölçü oranı	34

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Analiz Merkezleri	13
Tablo 3.2. Farklı analiz merkezlerine ait son saat ürün dosyaları örnekleme aralığı ve içerdiği GNSS sistemleri	14
Tablo 3.3. Farklı analiz merkezlerine ait son yörünge dosyaları örnekleme aralığı ve içerdiği GNSS sistemleri	14
Tablo 5. 1. GBM analiz merkezi karesel ortalama hata ve hadamard sapması sonuçları	35
Tablo 5. 2. Çoklu uydu yöntemi standart sapma sonuçları (birim: cm).....	36
Tablo 5. 3. Tek uydu ve çoklu uydu yöntemlerinin standart sapma sonuçları (birim: cm)	36

1. GİRİŞ

Günümüzde bilimin ve teknolojinin gelişmesiyle jeodezik ve jeodinamik amaçlarla konum belirleme alanlarında daha doğru ve daha güvenilir sonuçlara ulaşmak mümkün olmaktadır. İlk yapay uydu olan Sputnik 1'in 1957'de uzaya fırlatılmasından sonra uydu jeodezisi ortaya çıkmıştır. Hesaplama tekniği ve elektronik bilimdeki gelişmeler sayesinde uzay araştırmalarının hızlanması, Küresel Konum Belirleme Sistemini (GNSS) günlük yaşamda yaygın hale getirmiştir. (Bülbül vd., 2022).

GNSS ile konum belirlenmesi bağıl konum belirleme ve mutlak konum belirleme yöntemleri olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Bağıl konum belirleme yönteminde en az iki GNSS alıcısı kullanılırken, mutlak konum belirlemede tek GNSS alıcısıyla konum belirlenmektedir. Nokta konumlarının tek bir GNSS alıcısı tarafından hesaplanmasına olanak tanıyan algoritmaların geliştirilmesi, Hassas Nokta Konumlandırma (PPP) teknolojisinin ortaya çıkmasına yol açmıştır (Zumberge vd., 1997). PPP tekniğinin tarihi 1976 yılına dayanmaktadır. Son yıllarda PPP tekniği dünya çapında birçok GNSS uygulamasında kullanılmaktadır. PPP tekniği ile statik ve kinematik ölçümler için sırası ile, mm ve cm mertebesinde duyarlılık elde edilebilmektedir. PPP iyonosferden kaynaklı hataları modelleme, jeolojik tehlike izleme ve kinematik konum belirleme gibi GNSS uygulamalarına hizmet etmektedir (Zumberge vd., 1997). PPP tekniğinde, tek bir GNSS alıcısından elde edilen veriler, çeşitli kurumlar tarafından sağlanan hassas uydu yörünge ve saat bilgileri ile birlikte işlenerek yüksek hassasiyetli konum belirleme yapılabilmektedir (Uçarlı vd., 2021). Uydu yörünge bilgileri belirli bir zaman aralığında uyduların üç boyutlu yer merkezli yer sabit (ECEF) koordinatlarını içermektedir. Tüm uydu yörünge konumları ITRF (International Terrestrial Reference Frame) X, Y, Z koordinat sisteminde kilometre cinsinden verilmektedir. Yörünge dosyasında saat değerleri ise mikrosaniye birimindedir (Farhan, 2021). Yörünge dosyaları SP3 (Standard Product) formatında belli bir örnekleme aralığında yayınlanmaktadır. Uydu saat ürünü ise uyduların saat düzeltmelerini içermektedir. Saat düzeltmeleri CLK formatında 5 dakikalık veya 30 saniyelik aralıklarla SP3 verilerinden daha yüksek bir örnekleme aralığında yayınlanmaktadır. Uydu yörünge ve saat ürünleri Uluslararası GNSS Servisi (IGS) vb. servisler tarafından sağlanmaktadır (Lynn & App, 2009).

IGS, ilk olarak 1993'te Uluslararası Jeodezi Birliği (IAG) tarafından Çin'de düzenlenen bilimsel bir toplantıda onaylanmıştır (URL 1). 1994 yılında hizmete girmiştir. IGS en başta Uluslararası GPS servisi adıyla kurulmuştur. Bu isim 2005'te Uluslararası

GNSS Servisi olarak değiştirilmiştir (URL 2). IGS 2007 yılında gerçek zamanlı pilot projesini başlatmış ve RTCM'ye (Radio Technical Commission for Maritime Services) dayalı GPS ve GLONASS çift sistem yörünge ve saat düzeltmelerini sağlamıştır (Wang vd., 2018). 2013'ten beri Uluslararası GNSS Servisi (IGS) kullanıcılara gerçek zamanlı servis hizmeti sunmaya başlamıştır. Bu sayede kullanıcıların uydu yörünge ve saat ürünlerine ulaşmaları sağlanmıştır (İnal vd., 2022). Gerçek zamanlı hizmete (RTS) destek sağlayan IGS analiz merkezleri; BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) , CNES (Centre National d'Etudes Spatiales), GMV (GMV Aerospace and Defense), DLR (Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt), ESA/ESOC (European Space Agency's Space Operations Centre), GFZ (Deutsches Geo Forschungs Zentrum), WUHAN (Wuhan Technical University) ve NRCan (Natural Resources Canada) 'dır (Turgut, 2019). Analiz merkezlerinden GeoForschungsZentrum (GFZ), Wuhan Üniversitesi (WHU) ve Center for Orbit Determination in Europe (CODE) her bir GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, Beidou) yörünge/saat ürünlerini üretmektedir.

Analiz merkezleri arasında yörünge entegrasyonu ve saat tahminleri için kullanılan farklı yöntemler nedeniyle, analiz merkezleri yörünge/saat ürünleri arasında farklılıklar gözlemlenmektedir (Hou vd., 2022). IGS ve çeşitli analiz merkezleri kullanıcılara hassas uydu yörünge ve saat ürünlerini ultra hızlı, hızlı ve final olmak üzere üç farklı türde sağlamaktadır (Wang vd., 2018). Ultra hızlı, hızlı ve son ürünler arasında gecikme ve doğruluk farkı vardır. Bu fark temel olarak kullanılan GNSS istasyonu sayısından kaynaklanmaktadır. Zaman kısıtlamasından dolayı analiz merkezleri ultra hızlı ve hızlı ürünlerde son ürünlere göre daha az sayıda istasyon kullanmaktadır (Farhan, 2021). Final ürünler, ultra rapid ve rapid ürünlere göre daha yüksek duyarlılığa sahiptir (Alkan vd., 2014). Yapılan bazı çalışmalar hızlı, ultra hızlı ve gerçek zamanlı ürünler arasındaki saat ve yörünge farklılıklarına da odaklanmaktadır (Li vd., 2015 ; Li vd., 2022; Zhao vd., 2023).

Hedef ürünlerin kalitesini referans ürünlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirmek için hem yörünge hem de saat farklarını doğru bir şekilde hesaplamak önemlidir. Uydu yörüngesinde sapmalar radyal (radial), yol (along-track) ve çapraz-yol (cross-track) olmak üzere üç biçimde gerçekleşmektedir (Şahin, 2019). Radyal, yol ve çapraz-yol yörünge farklılıklarının aksine, analiz merkezlerine özgü saat veri farklılıkları olarak bilinen sistematik sapma nedeniyle saat farkları ürünler arasında doğrudan hesaplanamaz (Guo vd., 2023). Başka bir deyişle GNSS sistemindeki zaman ölçeklerinin seçimindeki farklılıklar nedeniyle farklı analiz merkezleri arasındaki uydu saat ürünleri karşılaştırması

doğrudan yapılamaz (Montenbruck vd., 2015). Zaman ölçeği farkı, farklı uydu saatlerinin ve referans saatin arasındaki zaman farkını ifade etmektedir. Zaman ölçeği farkları esas olarak analiz merkezleri veya ürünler tarafından kullanılan farklı referans saatlerden kaynaklanmaktadır. Saat dosyalarının çoğu, başlık bölümünde referans saat bilgilerini içermektedir. Şekil 1.1.'de GBM (GeoForschungsZentrum) analiz merkezinden elde edilen bir saat dosyasının başlık bölümü gösterilmiştir.

1	gbm21420.clk	3.00	C			RINEX VERSION / TYPE
2	EPOS-8	GFZ		20210405 175748 LCL	PGM / RUN BY / DATE	
3	2	AS	AR		# / TYPES OF DATA	
4	GFZ	GeoForschungsZentrum Potsdam			ANALYSIS CENTER	
5	1				# OF CLK REF	
6	brst	10004M004			ANALYSIS CLK REF	
7	Clocks are re-aligned to broadcast GPS time					COMMENT
8	128	IGb14			# OF SOLN STA / TRF	
9	nya2	10317M008	1202379268	252474683	6237786601SOLN	STA NAME / NUM
10	ous2	50212M002	-4387891080	733421003	-4555175992SOLN	STA NAME / NUM
11	pots	14106M003	3800689378	882077644	5028791472SOLN	STA NAME / NUM
12	rio2	41507M006	1429907895	-3495354950	-5122698513SOLN	STA NAME / NUM
13	scub	40701M001	1474537993	-5811243261	2168958894SOLN	STA NAME / NUM
14	sgoc	23501M003	1113279631	6233644317	760277260SOLN	STA NAME / NUM
15	tash	12327M001	1695944773	4487138665	4190140750SOLN	STA NAME / NUM
16	ulab	24201M001	-1257409024	4099404320	4707992552SOLN	STA NAME / NUM
17	unsa	41514M001	2412830479	-5271936790	-2652208858SOLN	STA NAME / NUM
18	urum	21612M001	193030130	4606851255	4393311495SOLN	STA NAME / NUM
19	aira	21742S001	-3530185908	4118797196	3344036696SOLN	STA NAME / NUM
20	algo	40104M002	918129113	-4346071327	4561977918SOLN	STA NAME / NUM
21	alic	50137M001	-4052052778	4212835973	-2545104526SOLN	STA NAME / NUM
22	aspa	50503S006	-6100260187	-996502550	-1567977184SOLN	STA NAME / NUM
23	bjfs	21601M001	-2148744592	4426641160	4044655799SOLN	STA NAME / NUM
24	bogt	41901M001	1744398868	-6116036990	512731921SOLN	STA NAME / NUM
25	braz	41606M001	4115014068	-4550641647	-1741443759SOLN	STA NAME / NUM
26	brew	40473M001	-2112007382	-3705351824	4726827026SOLN	STA NAME / NUM
27	brst	10004M004	4231162387	-332746394	4745131085SOLN	STA NAME / NUM
28	brux	13101M010	4027881357	306998761	4919499035SOLN	STA NAME / NUM
29	ccj2	21732M002	-4490605112	3483895060	2884928332SOLN	STA NAME / NUM
30	cedu	50138M001	-3753473241	3912741032	-3347959642SOLN	STA NAME / NUM
31	chti	50242M001	-4607856257	-272375306	-4386954153SOLN	STA NAME / NUM
32	chur	40128M002	-236439164	-3307616960	5430049341SOLN	STA NAME / NUM
33	darw	50134M001	-4091359650	4684606406	-1408579061SOLN	STA NAME / NUM
34	davl	66010M001	486854587	2285099165	-5914955715SOLN	STA NAME / NUM
35	dgar	30802M001	1916268723	6029977745	-801719381SOLN	STA NAME / NUM
36	drao	40105M002	-2059165048	-3621108406	4814432221SOLN	STA NAME / NUM
37	dubo	40137M001	-417603979	-4064529839	4881432126SOLN	STA NAME / NUM
38	flin	40135M001	-766174866	-3611375374	5184056200SOLN	STA NAME / NUM

Şekil 1.1. GBM analiz merkezinden elde edilen bir saat dosyasının başlık bölümü

Şekilde GBM analiz merkezinden elde edilen saat dosyasının başlık bölümünde 24.01.2021 tarihli gün için referans saatinin brst olduğu görülmektedir. "10004M004" kodu brst istasyonunun IGS kodudur. 128, çözümde kullanılan istasyon sayısını ifade eder. IGb14 kullanılan koordinat sisteminin adıdır. IGb14, ITRF2014 referans sisteminin bir versiyonudur. Bu saat dosyasının referans saati brst istasyonuna dayanmaktadır ve tüm saat verileri bu istasyona göre hesaplanmıştır.

Zaman ölçeği farkları, ayrıca analiz merkezine özgü saat verisi, GNSS sistemi ve işleme stratejilerinin kombinasyonu gibi faktörlerden de kaynaklanmaktadır. Bu nedenle,

aynı referans saatleri kullanılsa bile, analiz merkezleri arasında sistematik saat datum farklılıkları ortaya çıkabilir.

Analiz merkezleri arasındaki zaman ölçeği farkını ortadan kaldırmak için tek uydu yöntemi çoğu literatür tarafından benimsenmiştir (Shi vd., 2015; X. Zhang vd., 2011; Guo vd., 2016). Bu yöntemde referans bir uydu seçilmelidir ancak iki saat ürünü arasındaki farkın sonuçları büyük ölçüde seçilen referans uyduya bağlıdır. Yao vd. (2017) tarafından önerilen diğer yöntem çoklu uydu yöntemidir. Çoklu uydu yönteminde tüm uydular birlikte değerlendirilmektedir. Bu nedenle bir referans uydu seçme ön koşulu ortadan kalkmaktadır. Yao vd. (2017) çoklu uydu yönteminin, farklı referans uydu seçimleri arasındaki tutarsız sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, tek uydu yönteminin dezavantajlarını azalttığı ön görülmüştür. Ayrıca tek uydu yönteminde kalitesi yüksek olan uydunun referans olarak seçilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Ancak tek uydu yönteminde referans uydu seçimi için hangi kriterlere dikkat edilmesi gerektiği araştırılmamıştır. Ayrıca literatürde, GPS saat verileri dışında, GLONASS, Galileo ve BeiDou saat verileri de tek uydu ve çoklu uydu yöntemleri kullanılarak saat farkı açısından incelenmemiştir.

Bu tez çalışmasında GBM (GeoForschungsZentrum Potsdam) ve WUM (Wuhan University) analiz merkezlerinden 2021 yılının 24-30. günleri için saat ürünleri elde edilmiştir. Bu uydu saat ürünleri tek uydu ve çoklu uydu yöntemine göre karşılaştırılmıştır. Tüm uydu sistemlerindeki saat bilgilerinin kendi içerisindeki tutarlılığı karesel ortalama hata, hadamard varyans, uyuşumsuz ölçü oranı, Kt (Frekans doğruluğu) değerleri hesaplanarak incelenmiştir. Her bir uydunun saat doğruluğunun analizi yapılarak tek uydu yöntemi için kalitesi yüksek olan uyduyu referans seçmekle, kalitesi düşük olan uyduyu referans seçmenin sonuçları nasıl etkilendiği ve bunlar arasında bir korelasyon olup olmadığı araştırılmıştır.

1.1. Tez Düzeni

Bu tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde çalışmanın giriş kısmı açıklanmıştır.

İkinci bölümde ise tez konusuyla ilgili daha önce yapılmış çalışmaların yer aldığı kaynak araştırması kısmı açıklanmıştır.

Üçüncü bölümde IGS, GNSS yörünge ve saat ürünleri, IGS hızlı ürünler, IGS ultra hızlı ürünler, IGS son ürünler ve IGS analiz merkezleri tablolara yer verilerek detaylı olarak anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde materyal ve yöntem açıklanmıştır. Tek uydu yöntemi ve çoklu uydu yöntemi denklemlerle ve şekillerle açıklanmıştır. Hadamard varyans, frekans doğruluğu, karesel ortalama hata ve uyuşumsuz ölçü oranı değerlerinin hesaplanması için kullanılan denklemler detaylı olarak anlatılmıştır.

Beşinci bölümde araştırma ve bulgulara yer verilmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular grafikler halinde detaylı olarak açıklanmıştır. Tek uydu yöntemindeki referans uydu seçimi için karesel ortalama hata, uyuşumsuz ölçü oranı, frekans doğruluğu, hadamard varyans kriterlerinden elde edilen sonuçlar tek uydu yöntemindeki saat farkları ile her bir GNSS için karşılaştırılmıştır.

Altıncı bölümde ise sonuçlara yer verilmiştir ve bu çalışmadan çıkan sonuçlar üzerinden gelecekte yapılacak çalışmalar için bazı önerilerde bulunulmuştur.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yao vd. (2017), GNSS uydu saat ürünleri için geliştirilmiş bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde uydu saat ürünlerinde zaman ölçeği farkını ortadan kaldırmak için tek uydu referans yöntemi yerine çoklu uydu referans yöntemi kullanılmıştır. Yöntemi doğrulamak için iki farklı örnek yürütülmüştür. Çalışmada, uydu saat ürünlerinin değerlendirilmesinde önemli bir rol oynayan tek uydu referans yöntemi de tartışılmıştır. Sonuçlar çoklu uydu yöntemi kullanmanın, tek uydu yöntemindeki farklı referans uydu seçimindeki tutarsız sonuçları ortadan kaldırdığını göstermektedir. Aynı zamanda tek uydu yöntemi için kalitesi iyi olan uyduyu referans seçmek gerektiği vurgulanmıştır.

Yuan vd. (2020), Beidou (BDS) saat ürünlerini değerlendirmek için çoklu uydu yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan BDS saat ürünleri (CLK16, CLK20 ve CLK93) WHU, DLR ve CNES analiz merkezlerinden ücretsiz olarak elde edilmiştir. Çalışmada tek uydu yöntemi ve çoklu uydu yöntemi arasındaki farklar da tartışılmıştır. Tek uydu yönteminde referans bir uydu seçilmiştir ancak sonuçların seçilen referans uyduya göre değiştiği görülmüştür. Bu yüzden tüm uyduların referans olarak kullanıldığı çoklu uydu yönteminin, tek uydu yöntemindeki saat farklarındaki hataları azalttığı tespit edilmiştir.

Zhang vd. (2019), MADOCA (Multi-GNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) hizmetleri ile IGS son ürünleri doğruluk açısından karşılaştırılmıştır. Bu ürünler için yörünge ve saat değerlendirmesi yapılmıştır. Saat değerlendirmesinde, ortalama uydu saat düzeltmeleri referans saat hatası olarak alınmış ve daha sonra her uydu için standart sapma (STD) hesaplanmıştır. Saat ürünü karşılaştırması yapmak için tek uydu yöntemi ve çoklu uydu yöntemi açıklanmıştır. Çoklu uydu yönteminin, saat farklarındaki tutarsız değerleri ortadan kaldırdığı ve GPS hassas saat düzeltmelerinin doğruluğunu değerlendirmek için güvenilir bir yaklaşım haline geldiği tespit edilmiştir. Yedi günlük değerlendirme sonucuna göre uydu yörünge hatasının 1.8 ila 3.9 cm arasında ve saat hatasının 0.04 ila 0.15 nanosaniye arasında değiştiği görülmüştür.

Wang vd. (2018), sekiz analiz merkezinden (IGS, BKG, DLR, ESA, GFZ, GMV, CNES, CAS) uydu yörünge ve saat ürünleri elde edilmiştir. Bu ürünler IGS, ESA ve GBM tarafından yayınlanan final ürünler ile karşılaştırılıp hassas nokta konumlandırma doğruluğu değerlendirilmiştir. Saat ve yörünge değerlendirmesi yapılmıştır. Saat

karşılaştırması için çoklu uydu yöntemi kullanılmıştır. Gerçek zamanlı saat ile referans saat arasındaki farkların standart sapması ve karesel ortalama hatası hesaplanmıştır. Sonuç olarak seçilen sekiz analiz merkezinden elde edilen uydu yörünge ve saat ürünlerinin, hassas nokta konumlandırma doğruluğu açısından güvenilir olduğu tespit edilmiştir.

Nie vd. (2021), 3 günlük PPP-B2b mesajlarıyla BDS PPP-B2b hizmetinin ilk değerlendirmesi yapılmıştır. PPP-B2b yörünge ve saat düzeltmeleri ile son hassas çoklu GNSS efemeris ürünleri karşılaştırılmıştır. Saat düzeltmeleri karşılaştırmasında zaman ölçeği farkını ortadan kaldırmak için tek uydu yöntemi kullanılmıştır. PPP-B2b hassas saat ürünlerinden bir referans uydu saati seçilmiştir. Referans saat ile diğer uydular arasındaki saat farkı hesaplanmıştır. Sonuçlar PPP-B2b saat farklarının genel olarak 3 santimetreden daha az olduğunu göstermiştir.

Guo vd. (2016), çalışmada, 2014 yılı için MGEX Analiz Merkezleri (CODE, GFZ, ESA, WHU) tarafından üretilen GPS ve GLONASS uydu sistemine ait ürünlerin yörünge ve saat kalitesi, IGS GPS ve GLONASS ürünleri referans alınarak analiz edilmiştir. Saat ürünlerini değerlendirirken zaman ölçeği farkını ortadan kaldırmak için tek uydu yöntemi kullanılmıştır. Tek uydu yönteminde öncelikle bir uydu saati referans olarak seçilmiş ve diğer uydu saatlerinin aynı analiz merkezinden referans saate göre farkları alınmıştır. Daha sonra farklı analiz merkezinden aynı uydu çifti için saat farkları hesaplanmıştır. Sonuç olarak WUM analiz merkezinin yörünge ve saat verilerinin diğer analiz merkezlerinin ürünlerine kıyasla daha güvenilir olduğu tespit edilmiştir.

Montenbruck vd. (2015), IGS ve farklı analiz merkezlerinden (CODE, GFZ, JAXA) elde edilen saat ürünleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca sinyal-uzay mesafesi hatası da tüm GNSS'ler için karşılaştırılmıştır. Saat ürünlerini karşılaştırırken zaman ölçeği farkını ortadan kaldırmak için tek uydu yöntemi kullanılmıştır. Bir uydu referans seçilerek diğer uydularla olan saat farkı hesaplanmıştır. QZSS sistemi tek bir uydu içerdiğinden saat karşılaştırması yapmak için bir aylık saat ürünü elde edilip bunların arasından bir ürünün QZSS uydusu referans olarak seçilmiştir. GPS uydu saatlerinde Block IIA uydularının yaklaşık 1 metre karesel ortalama hataya sahip olduğu ve Block IIF uydularının ise 0.4 metre karesel ortalama hataya sahip olduğu tespit edilmiştir. GLONASS uydu saatlerinde karesel ortalama hata değerinin 2 metre, Galileo saatlerinin karesel ortalama hatası 1.6 metre, Beidou saatlerinin karesel ortalama hatasının yaklaşık 1 metre ve QZSS saatlerinin karesel ortalama hatasının 0.6 metre olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada bu saat

hatalarındaki farkların GNSS sistemlerindeki farklı atomik saatlerden kaynaklandığı da vurgulanmıştır.

Zhao vd. (2021), çalışmada BDS sinyalindeki uzayda anormallik olasılığının son 6 yılda nasıl değiştiği analiz edilmiştir. BDS'nin üç uydu türü olan GEO (Geosynchronous Equatorial Orbit -Jeosenkron Ekvatorial Yörünge), IGSO (Inclined Geosynchronous Orbit - Eğimli Jeosenkron Yörünge) ve MEO'nun (Middle Earth Orbit-Orta Dünya Yörüngesi) uydu saat ve yörünge hataları incelenmiştir. IGS ve WUM analiz merkezinden yayınlanan uydu yörünge ve saat ürünleri karşılaştırılmıştır. Yörünge sapmalarından, radyal hatanın uydu yörünge ve saat hataları üzerindeki etkisinin, yol ve çapraz-yol boyunca hataya kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür. Saat ürünleri karşılaştırılırken zaman ölçeği farkını ortadan kaldırmak için tek uydu yöntemi açıklanmıştır. Ancak makalede tek uydu yönteminden ortaya çıkan sonuçlar açıklanmamıştır.

Shi vd. (2015), gerçek zamanlı uydu saat hatalarının GPS hassas nokta konumlandırma (PPP) tabanlı troposfer zenit toplam gecikmesi tahmini üzerindeki etkisi araştırılmıştır. GPS troposferi ZTD (zenit toplam gecikmesi) tahminlerinin yüksek doğruluğu çeşitli gecikme süreleriyle mevcut hassas uydu yörünge ve saat ürünlerine dayandığı ortaya koyulmuştur. Uydu saat hatalarının GPS PPP tabanlı troposfer ZTD tahminini nasıl etkilendiği incelenmiştir. Bunun için IGS saat ürünü IGSO1 ve CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) saat ürünü CLK90 kullanılmıştır. Saat karşılaştırması tek uydu yöntemiyle yapılmıştır. 1 numaralı GPS uydusu referans uydu olarak seçilmiştir. Referans uydu ile diğer uydular arasındaki saat farkı hesaplanmıştır. Sonuç olarak gerçek zamanlı IGS saat ürünlerinin karesel ortalama hatasının, gerçek zamanlı CNES saat ürünlerinden daha az olduğu tespit edilmiştir. Gerçek zamanlı CNES saat ürünlerinin standart sapmasının ise gerçek zamanlı IGS saat ürünlerine kıyasla daha az olduğu görülmüştür.

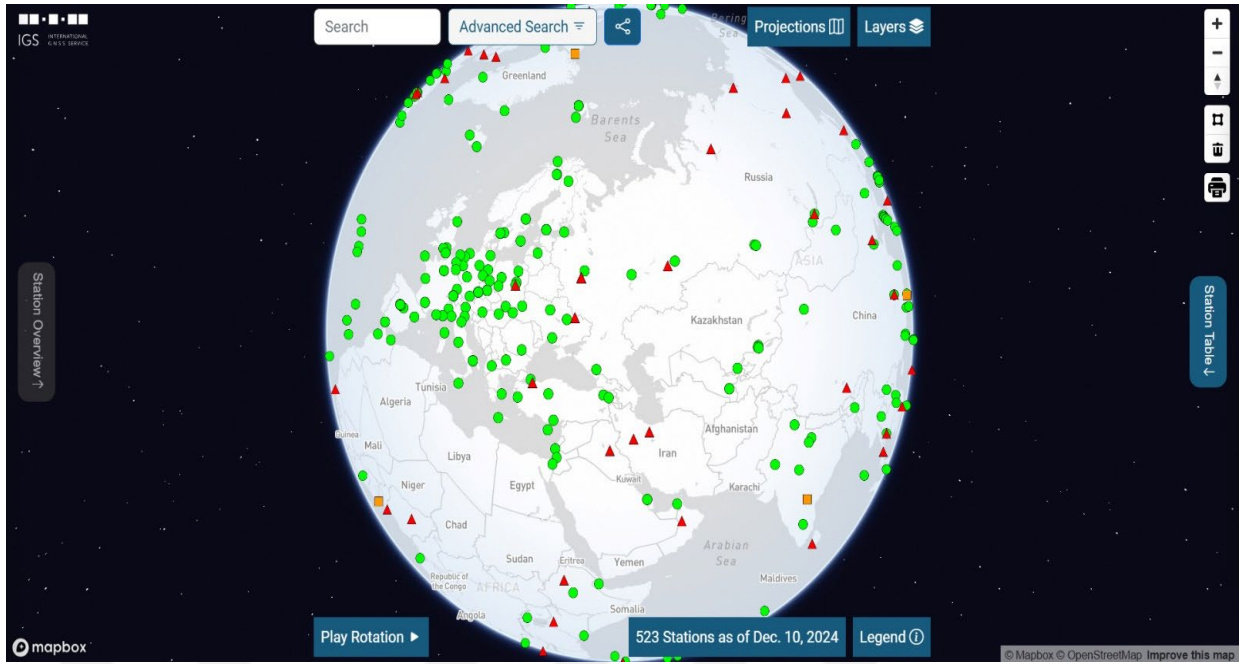
Xu vd. (2024), Wuhan Üniversitesi Çoklu-GNSS (WUM) saatlik güncellenen ultra hızlı ürünlerini üretmek için kullanılan model ve strateji özetlenmiştir. Farklı analiz merkezlerinden elde edilen uydu yörünge ve saat ürünlerinin değerlendirmesi yapılmıştır. Yörünge değerlendirmesi, Uluslararası GNSS Servisi (IGS) ve Wuhan Üniversitesi Çoklu GNSS yörüngeleri ile karşılaştırmalı bir analiz yoluyla yürütülmüştür. Yakın gerçek zamanlı yörüngelerin üç boyutlu hassasiyeti, GPS, GLONASS, Galileo ve BDS3 MEO uyduları için sırasıyla 2,4 cm, 4,6 cm, 3,8 cm ve 4,9 cm'ye ulaşmaktadır. BDS ve QZSS'nin IGSO uyduları ile ilgili olarak, karşılık gelen değerler 11,4 cm ile 15,7 cm arasında değişmektedir. Buna karşılık, BDS ve QZSS'nin GEO uyduları, sırasıyla 234,7

cm ve 70,9 cm tutarlılıklar göstererek nispeten daha düşük performans sergilemektedir. Saat karşılaştırması tek uydu yöntemi ile yapılmıştır. Tek uydu yönteminde bir uydu saati referans olarak seçilir ve diğer uydu saatlerinin bu belirli uyduya göre farkları alınarak zaman ölçeği farkı ortadan kaldırılmaktadır. Daha sonra, aynı uydu çiftinin saatleri IGS (Uluslararası GNSS Servisi) ve CODE (Avrupa Yörünge Belirleme Merkezi) verileri ile karşılaştırılmıştır. WUM (Wuhan University) NRT (Near Real Time- Yakın Gerçek Zamanlı) saatlerinin IGS ve CODE nihai saat ürünlerine göre ortalama standart sapma değerleri hesaplanmıştır. GPS, Galileo, GLONASS, BDS3-MEO ve QZSS uyduları için standart sapma sonuçları yaklaşık olarak sırasıyla 0.4 ns (nanosaniye), 0.2 ns, 0.7 ns, 0.2 ns ve 0.5 ns'dir. BDS2-MEO ve BDS3-IGSO uydularının standart sapması yaklaşık 0.7 nanosaniyedir. BDS2-IGSO uydularının standart sapması ise yaklaşık olarak 0.9 nanosaniye olmakla birlikte tüm sistemler arasında en yüksek standart sapmaya sahiptir. Standart sapması en düşük olan uydu sistemi Galileo ve BDS3-MEO uydularıdır. Ardından sırasıyla GPS, QZSS ve GLONASS uyduları gelmektedir. Ayrıca yakın gerçek zamanlı ürünlerin doğrulaması, PPP-AR (Ambiguity Resolution- Belirsizlik Çözümü) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. PPP-AR çözümü, IGS haftalık çözümleri için sırasıyla doğu (east), kuzey (north) ve yukarı (up) yönlerde 1,6 mm, 1,7 mm ve 5,0 mm doğruluk göstermektedir.

3. ULUSLARARASI GNSS SERVİSİ (INTERNATIONAL GNSS SERVICE-IGS)

Uluslararası GNSS servisi, yüksek hassasiyetli GNSS verileri ile GNSS verilerinden oluşturulan ürünleri kullanarak jeodezik ve jeodinamik amacıyla yapılan GNSS uygulamalarına, destek sağlayan bir kurumdur (Johnston vd., 2017). Kısaca IGS olarak bilinen Uluslararası GNSS servisi 80 ülkede faaliyet gösteren, dünya genelinde 200'den fazla gönüllü ajansın bir araya geldiği ve çeşitli uygulamalara destek sağlamak için kaynakları ve verileri bir araya toplayan 370'ten fazla izleme istasyonundan oluşan küresel bir ağıdır (Shakor, 2022). IGS, 1992 yılında kurulmuş ve 1994 yılında hizmete girmiştir.

IGS'nin temel görevi, GNSS'e ait yüksek kalitede verileri toplamak ve bunlardan üretilen ürünleri depolamak ve çeşitli bilimsel araştırmalar ile geniş bir uygulama alanına destek sağlamaktır. Bu kapsamda, IGS, belirli doğruluk standartlarını karşılayan GPS gözlemlerinden oluşan veri ve ürün gruplarını toplar, arşivler ve bu bilgileri internet üzerinden erişilebilir hale getirmektedir (Rahmanlar, 2019). IGS, küresel izleme ağı aracılığıyla analiz merkezlerine uydu efemeris ve saat çözümleri sağlamaktadır. IGS son zamanlara kadar, sadece GPS ve GLONASS için hassas yörünge ve saat ürünleri yayınlanmaktaydı. Galileo ve BeiDou gibi yeni uydu sistemlerinin gelişimiyle birlikte, bu sistemlere özel hassas uydu yörünge-saat ürünleri sunmak amacıyla IGS, Çoklu GNSS Deneyimi (MGEX) projesini başlatmıştır. Bu hedef doğrultusunda, dünya çapında birçok yeni çoklu GNSS izleme istasyonları ağı, gönüllü kurum ve kuruluşların katkılarıyla kurulmuştur. Şekil 3.1'de IGS izleme istasyonları ağı verilmiştir.



Şekil 3.1. IGS izleme istasyonları ağı (URL 3)

Günümüzde, 10 kadar IGS Analiz Merkezi (AC) ultra hızlı, hızlı ve son GPS/GLONASS yörünge ve saat çözümlerine katkıda bulunmaktadır. Bu analiz merkezleri arasında Center for Orbit Determination in Europe (CODE), European Space Agency (ESA), Geo Forschungs Zentrum Potsdam (GFZ), Jet Propulsion Laboratory (JPL), Natural Resources Canada (NRCan), Massachusetts Institute of Technology (MIT), Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale (GRGS), Wuhan University (WUM) sayılabilir. 2000 yılından bu yana, orijinal olarak meteorolojik uygulamalara hizmet etmek ve alçak yörünge görevlerini desteklemek üzere tasarlanan ultra hızlı ürün kullanıma sunulmuştur. 1 Nisan 2013'te, yüksek hassasiyetli yörünge ve saat ürünleri sağlayan IGS gerçek zamanlı hizmet sağlamak için Gerçek Zamanlı Pilot Projesini resmen başlatmıştır. Kullanıcılara gerçek zamanlı ve gerçek zamanlıya yakın ürünler sunulmuştur. (Kouba, 2009). Bu ürünler, hem statik hem kinematik modlar için yüksek veri hızında gözlem sağlayarak desimetre seviyesinde hassasiyet sunmaktadır. IGS SP3 dosyalarında, uydu saatleri 15 dakika aralıklarla sağlanmaktadır. Ayrıca, 26 Aralık 1999'dan bu yana uydu/istasyon saat kombinasyonlarına 5 dakika örnekleme aralıklarıyla erişilebilmektedir. 5 Kasım 2000 tarihinden itibaren, bu saat kombinasyonları resmi olarak IGS saat ürünleri haline gelmiştir. Saat enterpolasyon hatalarını santimetre seviyesinde korumak veya daha altında tutmak amacıyla 14 Ocak 2007'den itibaren 30 saniye örneklem aralıklı IGS sonuç saat dosyaları kullanılmaktadır.

IGS, 5 Kasım 2000 tarihinden itibaren resmi olarak final, rapid ve ultra rapid ürünleri sağlamaktadır. Bu ürünler arasında gecikme ve doğruluk farkları vardır. Gecikme ve doğruluk farkları, farklı analiz merkezlerinden kullanılan GNSS istasyonu sayısından kaynaklanmaktadır (Ogutcu & Farhan, 2022). IGS ürün tanıtımlarında belirtildiği gibi (<https://igs.org/products/#about>) en yüksek doğruluğa sahip IGS final ürünleri 12 ila 18 gün ve hızlı ürünler 17 ila 41 saat gecikme ile yayınlanmaktadır. GNSS sisteminin gelişmesiyle düşük gecikme süresine yönelik artan gereksinimlerle birlikte, final ve rapid ürünler, gerçek zamanlı ve gerçek zamanlıya yakın kullanıcı ihtiyaçlarını karşılamakta zorlanmaktadır. Düşük gecikme süresine sahip ultra rapid ürünler, zamanın kısıtlı olduğu GNSS uygulamalarında büyük ilgi görmektedir (Jiao & Song, 2022). IGS ultra rapid yörünge ve saat ürünleri, gözlem ve tahmin kısımlarından oluşmaktadır. Tahmin edilen kısım, özellikle tahmin edilen saat kısmı, PPP için gerçek zamanlı saat sapmasını tahmin etmek amacıyla kullanılabilir. Tahmin edilen yörünge ise, gerçek zamanlı yörünge tahmin etmek için bir başlangıç değeri olarak da kullanılabilir. Ancak tahmin edilen kısımlardaki gözlem verilerinin eksikliği veya gecikmesi, tahmin edilen yörünge ve saatin doğruluğunu azaltmaktadır (Chen vd., 2021). Bu nedenle, altı saatte bir güncellenen ultra rapid GPS ürünleriyle, saat sapmaları tahmininin doğruluk kaybı nedeniyle yüksek hassasiyetli gerçek zamanlı uygulamaların karşılanması zordur (Jiao & Song, 2022).

Tablo 3.1 diğer tabloların daha kolay okunabilmesi için analiz merkezlerini ve bu analiz merkezlerinin kısaltmasını göstermektedir. Tablo 3.2, 3.3, farklı analiz merkezleri tarafından üretilen final yörünge ve saat ürünlerinin örnekleme aralığını ve bunların içerdiği GNSS sistemlerini göstermektedir.

Tablo 3.1. Analiz Merkezleri

Analiz Merkezi Kısaltması	Analiz Merkezleri
cod	Center for Orbit Determination in Europe (CODE)
emr	Natural Resources Canada
esa	European Space Agency
gbm	Geo Forschungs Zentrum Potsdam
gfz	Geo Forschungs Zentrum Potsdam
grg	CNES/CLS
igs	IGSACC
jpl	Jet Propulsion Laboratory
mit	Massachusetts Institute of Technology
wum	Wuhan University

Tabloda gbm ve gfz analiz merkezlerinin açıklamasının aynı olduğu görülmektedir. Bu iki analiz merkezi arasındaki fark içerdikleri GNSS sistemleridir. Aşağıdaki tablolarda da görüldüğü üzere gbm analiz merkezi GPS, GLONASS, Galileo, Beidou ve QZSS olmak üzere tüm sistemlerin yörünge ve saat ürünlerini üretmektedir. GFZ analiz merkezi ise sadece GPS ve GLONASS yörünge ve saat ürünlerini üretmektedir.

Tablo 3.2. Farklı analiz merkezlerine ait final saat ürün dosyaları örnekleme aralığı ve içerdiği GNSS sistemleri

SAAT DOSYASI_FINAL		
Analiz Merkezi	Örnekleme Aralığı (sn)	Uydu Sistemleri
cod	30	GRECJ
emr	30	G
esa	30	GR
gbm	30	GRECJ
gfz	30	GR
grg	30	GRE
igs	30	G
jpl	30	G
mit	30	G
wum	30	GRECJ

Tablo 3.3. Farklı analiz merkezlerine ait final yörünge dosyaları örnekleme aralığı ve içerdiği GNSS sistemleri

YÖRÜNGE DOSYASI_FINAL		
Analiz Merkezi	Örnekleme Aralığı (sn)	Uydu Sistemleri
cod	300	GRECJ
emr	900	G
esa	900	GR
gbm	300	GRECJ
gfz	900	GR
grg	300	GRE
igs	900	G
jpl	900	G
mit	900	G
wum	900	GRECJ

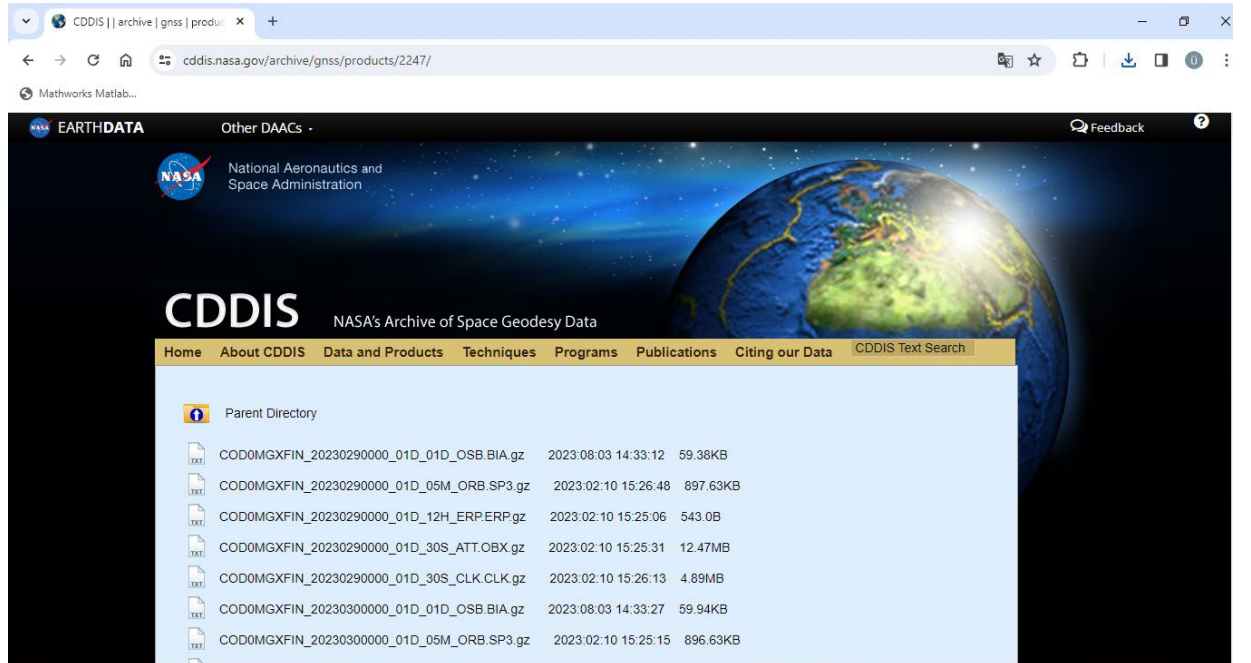
Tablolarda verilen G, R, E, C, J sırasıyla GPS, GLONASS, Galileo, Beidou ve QZSS uydu sistemlerini temsil etmektedir.

Tablolarda görüldüğü üzere tüm analiz merkezleri her bir GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou ve QZSS) yörünge/saat ürününü üretememektedir. Bunlar arasında GeoForschungsZentrum (GBM), Wuhan Üniversitesi (WUM) ve CODE, her GNSS sistemi için yörünge/saat ürünlerini üretmektedir. Daha detaylı bilgi Analiz Merkezi Koordinatörü (ACC) resmi web sitesinden (<https://igs.org/acc/>) elde edilebilir.



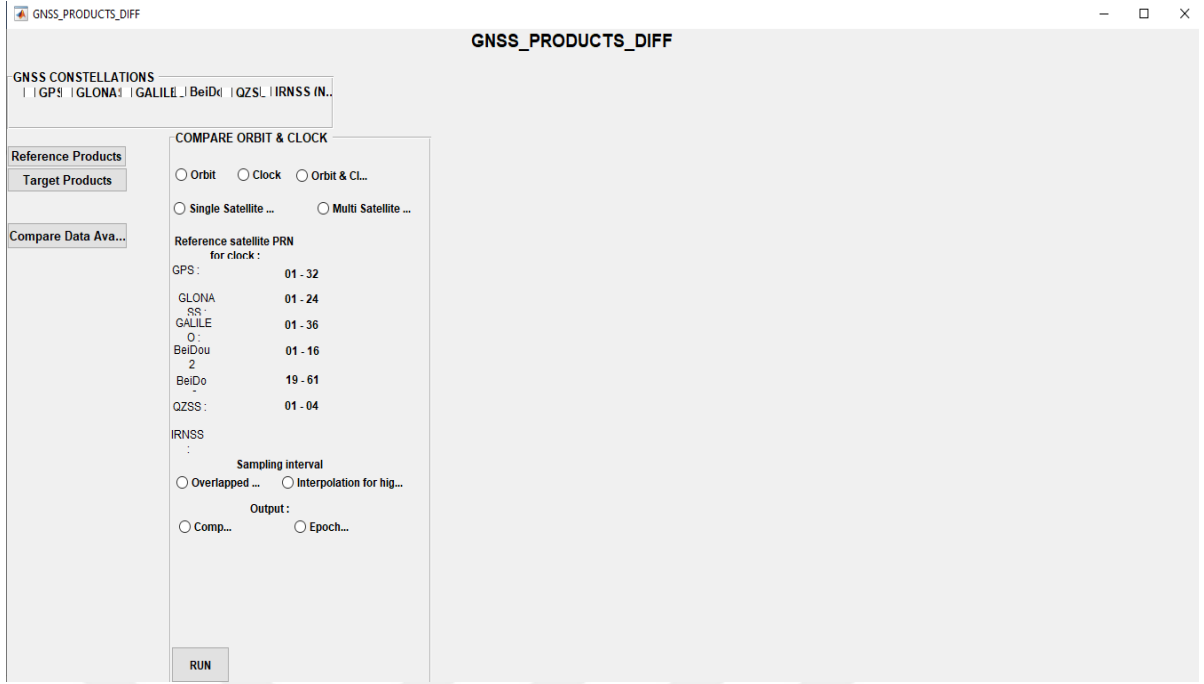
4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında GBM ve WUM analiz merkezlerinden 2021 yılındaki yedi günlük (24.01.2021-30.01.2021) uydu saat ürünleri (<https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/>) internet adresinden clk uzantılı olarak elde edilmiştir. CLK dosyalarında tüm uyduların saniye cinsinden saat düzeltmeleri bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan CLK dosyalarındaki saat düzeltmeleri 30 saniye örnekleme aralığına sahiptir. Şekil 4.1’de saat ürünlerinin elde edildiği CDDIS internet sayfasının görünümü verilmiştir.



Şekil 4.1. CDDIS (Crustal Dynamics Data Information System) internet sayfasının görünümü

Bu çalışma kapsamında MATLAB ortamında GNSS_PRODUCTS_DIFF yazılımı geliştirilmiştir. Bu yazılımın ana işlevi ürünler arasındaki yörünge farklarını (radyal, yol, çapraz-yol boyunca) ve saat farklarını hesaplamaktır. Yazılım GPS, GLONASS, Galileo ve Beidou (BDS-2 ve BDS-3) yörünge ve saat verilerini yörünge dosyalarından ve saat dosyalarından okuyabilmektedir. Saat karşılaştırması için tek uydu ve çoklu uydu yöntemleri yazılıma entegre edilmiştir. Şekil 4.2’ de GNSS_PRODUCTS_DIFF yazılımının arayüzü verilmiştir.



Şekil 4.2. GNSS_PRODUCTS_DIFF yazılımının arayüzü

GNSS_PRODUCTS_DIFF yazılımında önce hangi uydu sistemine ait sonuç elde edilmek isteniyorsa o uydu sistemi seçilir, ardından farklı analiz merkezlerinden elde edilen aynı güne ait referans ve hedef ürün dosyaları seçilir, saat farklarını hesaplamak için clock seçeneği işaretlenir, tek uydu ve çoklu uydu yöntemlerinden biri seçilir, son olarak ortak epok seçilerek yazılım çalıştırılmaktadır. İşlem sonucunda her bir uydu için txt uzantılı sonuç dosyaları elde edilmektedir. Bu sonuç dosyalarında tek uydu yöntemi ve çoklu uydu yöntemi için ayrı ayrı nanosaniye ve metre cinsinden uydu saatlerinin karesel ortalama hata değerleri ve standart sapma değerleri verilmiştir. Bu tez çalışmasında tek uydu ve çoklu uydu yöntemleri için metre cinsinden standart sapma değerleri santimetreye çevirilerek kullanılmıştır. Şekil 4.3' te GNSS_PRODUCTS_DIFF yazılımından elde edilen, tek uydu yöntemi kullanılarak elde edilen bir sonuç dosyası örneği verilmiştir.

E12 - Not Defteri

Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım

Reference: gbm21421.clk Target: wum21421.clk

```

=====GALILEO clock_comparisons=====
Reference Clock: E12
PRN  RMS(ns)  RMS(m)  STD(ns)  STD(m)
E01  0.212    0.064   0.170    0.051
E02  0.255    0.076   0.088    0.026
E03  0.393    0.118   0.128    0.038
E04  0.357    0.107   0.134    0.040
E05  0.431    0.129   0.144    0.043
E07  0.170    0.051   0.107    0.032
E08  0.287    0.086   0.133    0.040
E09  0.262    0.079   0.147    0.044
E11  0.179    0.054   0.099    0.030
E13  0.529    0.158   0.113    0.034
E14  0.274    0.082   0.063    0.019
E15  0.353    0.106   0.090    0.027
E18  0.309    0.093   0.084    0.025
E19  0.158    0.047   0.138    0.041
E21  0.509    0.153   0.133    0.040
E24  0.197    0.059   0.079    0.024
E25  0.237    0.071   0.075    0.022
E26  0.415    0.124   0.114    0.034
E27  0.204    0.061   0.079    0.024
E30  0.145    0.044   0.065    0.019
E31  0.338    0.101   0.132    0.039
E33  0.291    0.087   0.120    0.036
E36  0.331    0.099   0.110    0.033
Mean: 0.297    0.089   0.111    0.033

=====Clock_comparisons_uncorrected multi-satellite method=====
PRN  RMS(ns)  RMS(m)  STD(ns)  STD(m)
01   0.160    0.048   0.112    0.034
02   0.059    0.018   0.059    0.018

```

Şekil 4.3. GNSS_PRODUCTS_DIFF yazılımından elde edilen bir sonuç dosyası örneği

Tek uydu yönteminde zaman ölçeği farkını ortadan kaldırmak için bir referans uydu seçilmektedir. Uydu yönteminin hesaplanması şu şekilde ifade edilebilir:

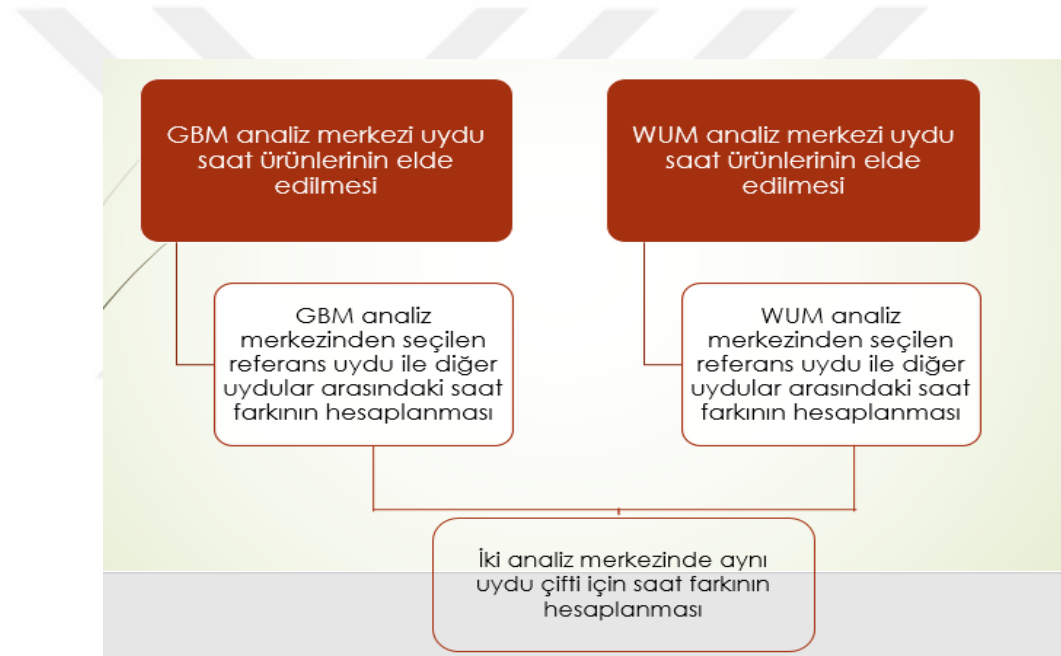
$$\Delta_{\text{ürün}_1}^{\text{uydular}} = dt_{\text{ürün}_1}^{\text{ref_uydu}} - dt_{\text{ürün}_1}^{\text{uydular}} \quad (1)$$

$$\Delta_{\text{ürün}_2}^{\text{uydular}} = dt_{\text{ürün}_2}^{\text{ref_uydu}} - dt_{\text{ürün}_2}^{\text{uydular}} \quad (2)$$

$$\nabla \Delta_{\text{ürün},1,2}^{\text{uydular}} = \Delta_{\text{ürün}_1}^{\text{uydular}} - \Delta_{\text{ürün}_2}^{\text{uydular}} \quad (3)$$

Bu denklemlerde Δ ve $\nabla \Delta$ tekli farkı ve ikili farkı göstermektedir. Tekli farklar aynı analiz merkezine ait referans uydu ile diğer uyduların saat düzeltmelerinin farkını ifade etmektedir. İkili fark ise iki farklı analiz merkezinde aynı uydu çiftinin saat farklarını ifade etmektedir. $dt_{\text{ürün}_1}^{\text{ref_uydu}}$ ve $dt_{\text{ürün}_2}^{\text{ref_uydu}}$ seçilen referans uydunun saat düzeltme değerini göstermektedir (örneğin G01 uydusu). $dt_{\text{ürün}_1}^{\text{uydular}}$ ve $dt_{\text{ürün}_2}^{\text{uydular}}$ referans uydu hariç tüm mevcut uyduların saat düzeltme değerlerini belirtmektedir. İkili farkın hesaplanmasından sonra analiz merkezlerine özgü zaman farkı ölçeği ortadan

kaldırılır ama analiz merkezleri arasındaki işleme stratejisi farklarından ve saat çözümlerinin gürültülerinden kaynaklanan farklar kalır. Bu nedenle saat düzeltmelerinin standart sapması, işleme stratejilerindeki farklılıklar ve saat çözümlerindeki gürültü dikkate alınarak, iki saat ürünü arasındaki saat karşılaştırmasının doğruluğunun bir ölçüsüdür. İkili farktaki saat düzeltmelerinin karesel ortalama hatası, iki saat ürünü arasındaki saat karşılaştırmasının doğruluğunun güvenilir bir ölçüsü değildir çünkü ortadan kaldırılamayan sapmaları içermektedir (Konukseven vd., 2022). Ayrıca, ortadan kaldırılamayan bu sapmalar PPP performansını da etkilemektedir. Saat ürünleri arasındaki standart sapma değerleri ne kadar yüksek olursa, PPP'deki tahmini koordinatlardaki fark o kadar fazla olur. Şekil 4.4' te tek uydu yönteminin akış şeması verilmiştir.



Şekil 4.4. Tek uydu yönteminin akış şeması

Çoklu uydu yöntemi, tek uydu yönteminin aksine tüm uyduların referans olarak seçildiği bir yöntemdir. Çoklu uydu yönteminin hesaplanması şu şekilde ifade edilebilir:

$$\delta_{\text{ürün}_1,2} = [\sum_{j=1}^s (dt_{\text{ürün}_1}^{\text{uydular}}) - \sum_{j=1}^s (dt_{\text{ürün}_2}^{\text{uydular}})] / s \quad (4)$$

$$\delta_{dt}^{\text{uydu}} = dt_{\text{ürün}_1}^{\text{uydular}} - dt_{\text{ürün}_2}^{\text{uydular}} - \delta_{\text{ürün}_1,2} \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemlerde s uydu sayısını ifade etmektedir. $\delta_{\text{ürün}_{1,2}}$ iki saat ürünü arasındaki referans saat farkını göstermektedir. $\delta_{dt}^{\text{uydu}}$, saat farklarının standart sapmasını belirtmektedir. Çoklu uydu yönteminde görüldüğü gibi, bir referans uydu seçme ön koşulu ortadan kalkmaktadır. Ayrıca, tek uydu yönteminde referans uydu seçiminin hesaplanan farklılıklar üzerindeki etkisi de ortadan kaldırılmıştır. Şekil 4.5'te çoklu uydu yönteminin akış şeması verilmiştir.



Şekil 4.5. Çoklu uydu yönteminin akış şeması

Zhang vd. (2019) ürünler arasındaki yüksek farklardan kaçınmak için en yüksek hassasiyete sahip uydunun referans olarak seçilmesi gerektiğini, tek uydu yöntemi için ifade etmiştir. Bununla birlikte, referans uyduyu hassasiyet kriterlerine göre seçmenin uygun ve pratik bir yolu yoktur. Ek olarak, referans uydu seçimi için hangi kriterlerin dikkate alınması gerektiği ile ilgili mevcut literatürde herhangi bir çalışma yoktur. Bu tez çalışmasında referans uydu seçimi için dört kriter– yani karesel ortalama hata, hadamard

varyans, uyuşumsuz ölçü oranı ve Kt (frekans doğruluğu) araştırılmıştır. Hadamard varyansı aşağıdaki ifadeyle açıklanır:

$$H\sigma^2(\tau) = \frac{1}{6\tau^2(N-3m)} \sum_{i=1}^{N-3m} (x_{i+3m} - 3x_{i+2m} + 3x_{i+m} - x_i)^2 \quad (6)$$

Burada $H\sigma^2(\tau)$ hadamard varyansıdır. x_i belirli zaman dilimindeki uydu saat hatasını, N saat hatalarının sayısını, m düzeltme faktörünü, τ örnekleme aralığını ifade etmektedir. Hadamard varyans, uydunun aynı frekansı sürekli olarak verip vermediğini ölçmek amacıyla hesaplanmaktadır. Bir uydu aynı frekansı ne kadar çok verirse hadamard varyansı o kadar düşmektedir. Kısaca hadamard varyans, frekans kararlılığını temsil etmektedir.

Frekans doğruluğu, gerçek frekansın nominal değere göre tutarlılık derecesini tanımlamaktadır. Yani bir uydu saatinin frekansının, teorik olarak vermesi gereken frekanstan farkıdır. Frekans doğruluğu aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$K_T = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) * (t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^N (t_i - \bar{t})^2} \quad (7)$$

Bu denklemde K_T frekans doğruluğunu gösterir. $\bar{x}$ saat sapmalarının ortalama değerini belirtir. t_i her ölçüm veya gözlemin hangi saniyede gerçekleştiğini belirtir. $\bar{t}$ yapılan tüm ölçümlerin saniye cinsinden ortalamasını ifade eder.

Uydu saatinin hassasiyetini değerlendirmek için genellikle faz, frekans ve frekans kaymasını içeren ikinci dereceden bir polinom modeli kullanılır. Bu ikinci dereceden polinom modeli aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$x_i = a_0 + a_1(t_i - t_0) + a_2(t_i - t_0^2) + \varepsilon_i \quad (8)$$

Bu denklemde a_0 , a_1 ve a_2 en küçük kareler yöntemiyle uydu saatinin fazını, frekansını ve frekans sapmasını belirtir. t_i ve t_0 gözlem zamanını ve referans zamanı belirtir. ε_i gürültüleri gösterir. x_i her bir gözlemin gerçek değeri ile model tarafından tahmin edilen değeri arasındaki farkı gösterir. Bu farklar küçük olduğunda, model gerçek verilere iyi uyum sağlamaktadır.

Bir uydunun gerçek saat değerleri vardır. Bu saat değerleri çizildiği zaman genelde doğrusal olarak artarak veya azalarak gitmektedir. Bu ham veriye yani gerçek değerlere uydu saatinin hassasiyetini değerlendirmek için yukarıda anlatıldığı gibi bir model geçirilmektedir. Karesel ortalama hata (KOH), hataların ortalama büyüklüğünü ifade eder ve bu modelin verileri ne kadar iyi temsil ettiğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Yani kısaca karesel ortalama hata, modelin duyarlılığını temsil etmektedir. Karesel ortalama hata ne kadar iyiye, model verileri o kadar iyi temsil ediyor demektir. Karesel ortalama hata, aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$KOH = \sqrt{\frac{V' * V}{N}} \quad (9)$$

Daha açık bir ifadeyle:

$$KOH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{N}} \quad (10)$$

Bu denklemlerde V vektörü modelden sapmaları temsil etmektedir. Karesel ortalama hata değeri bu sapmaların büyüklüğünün bir ölçüsüdür. x_i her bir gözlemin gerçek değeri ile model tarafından tahmin edilen değeri arasındaki farkı gösterir. N, bir uydu saat ürünündeki saat verisi sayısını belirtmektedir. Örneğin örnekleme aralığı 30 saniye olan bir saat dosyası için bir günde 2880 veri olacaktır.

Uyuşumsuz ölçü oranı ise normal kabul edilen ölçümlerle uyuşmayan ölçümlerin oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Uyuşmayan ölçülerin tespiti için MAD (Median Absolute Deviation- Medyan Mutlak Sapma) yöntemi kullanılmıştır. Yöntem aşağıdaki ifadeyle açıklanabilir:

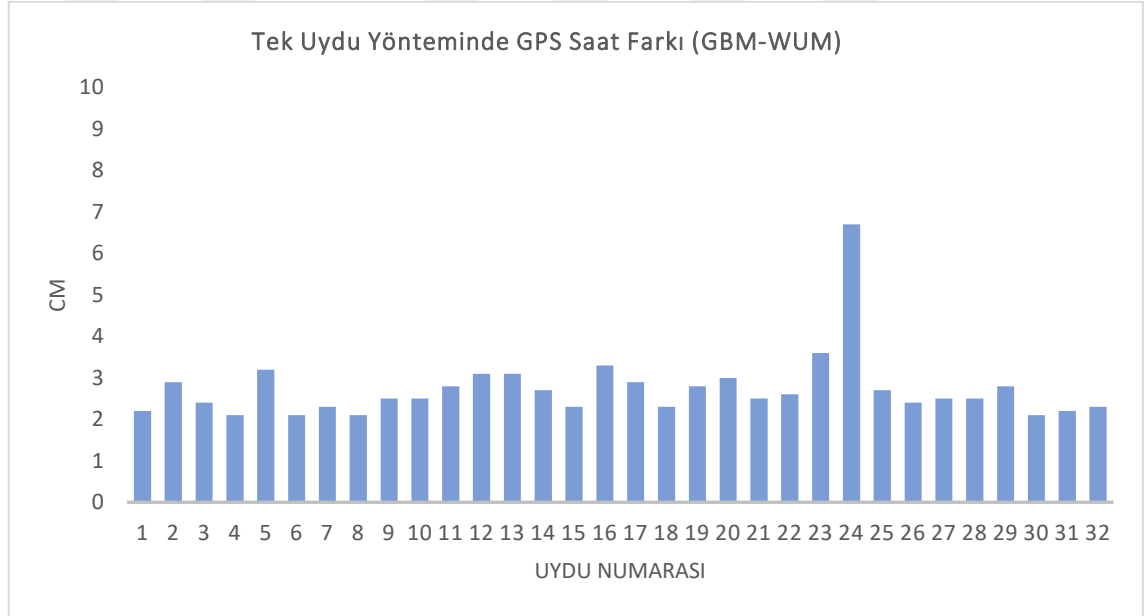
$$M = \text{Medyan} \left(\frac{b_u - m}{0.6745} \right) \quad (11)$$

Bu denklemde M, modelde eşik değerini temsil eden fark değeridir. u, frekans epok numarasıdır. m, saat frekans dizisinin medyanıdır. b_u , saat frekans dizisidir (Hauschild vd., 2013).

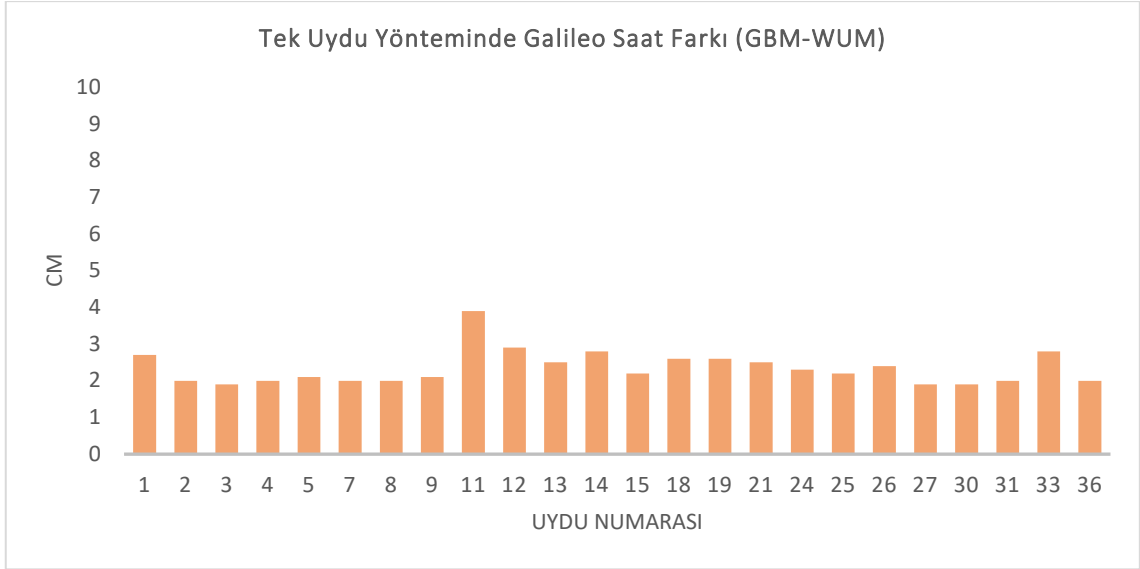
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Tek Uydu Yöntemi

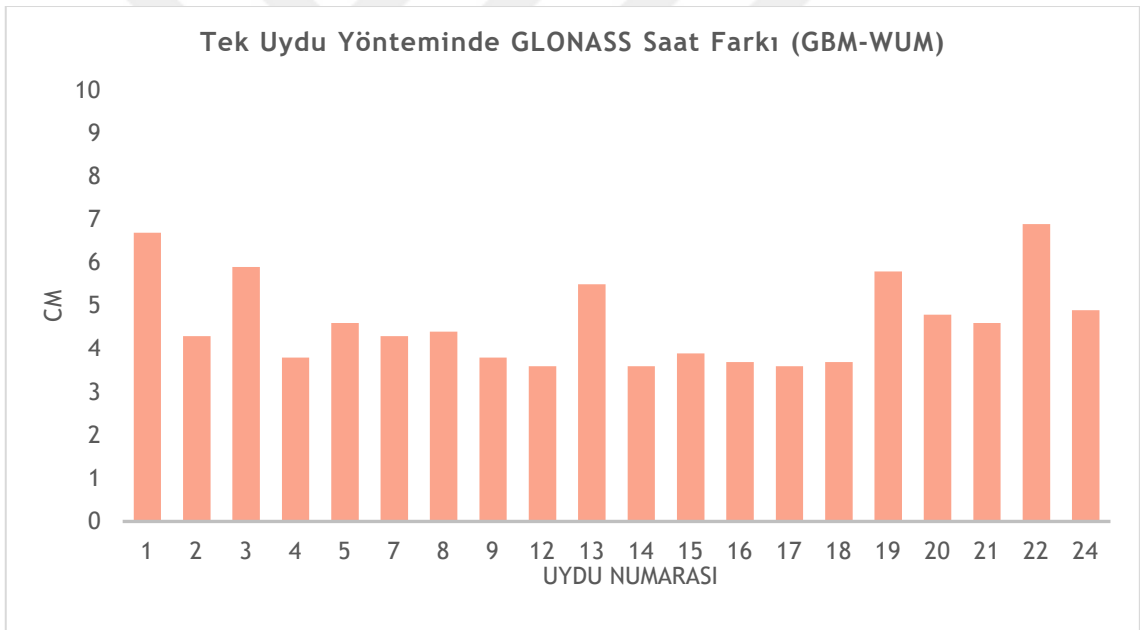
Uydular arasındaki saat farklarının standart sapma sonuçları tek uydu yönteminde referans uydu seçimiyle bağlantılıdır. Sonuçlar referans seçilen uyduya göre farklılık göstermektedir. Şekil 5.1-5.5 çalışmada kullanılan yedi günlük (24.01.2021-30.01.2021) uydu saat ürünlerinden 24.01.2021 tarihli gün için her bir referans uydusu (grafiklerin altındaki uydu numaraları) ile ilişkili GBM ve WUM arasındaki saat farklarının ortalama standart sapmasını göstermektedir. Uygun yorumlama için, saat farkları mesafelere (cm) dönüştürülmüştür.



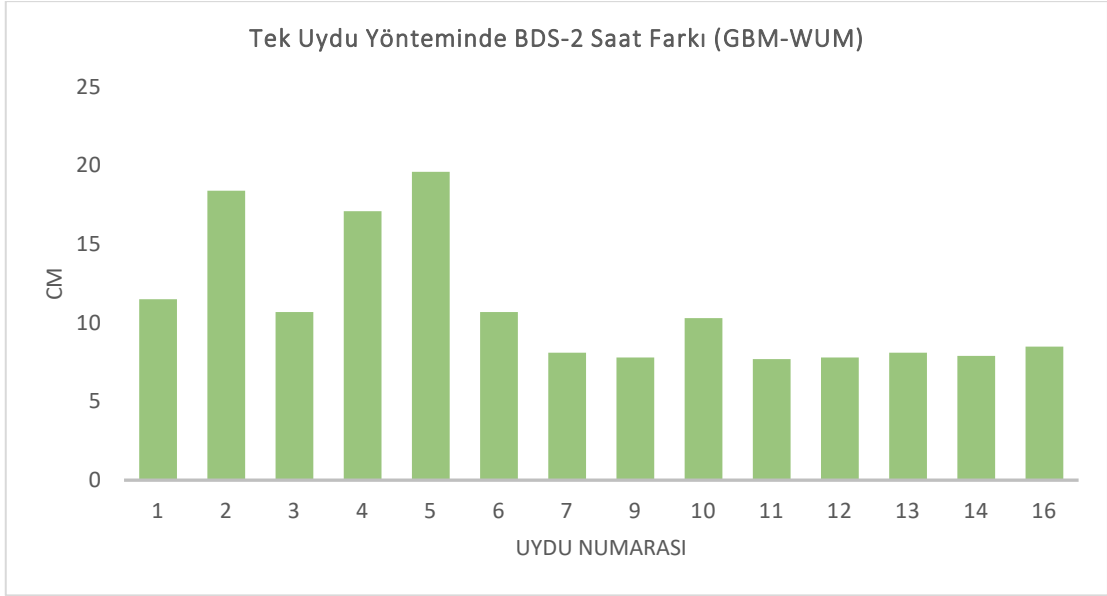
Şekil 5.1. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için GPS saat farklarının ortalama standart sapması



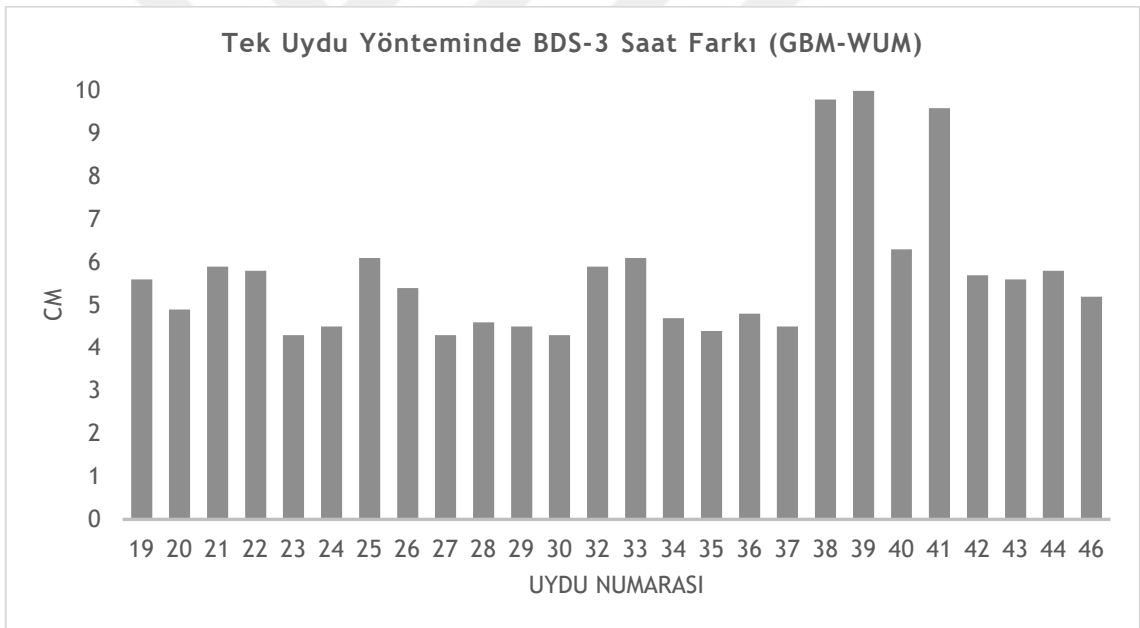
Şekil 5.2. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için Galileo saat farklarının ortalama standart sapması



Şekil 5.3. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için GLONASS saat farklarının ortalama standart sapması



Şekil 5.4. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için BDS-2 saat farklarının ortalama standart sapması



Şekil 5.5. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için BDS-3 saat farklarının ortalama standart sapması

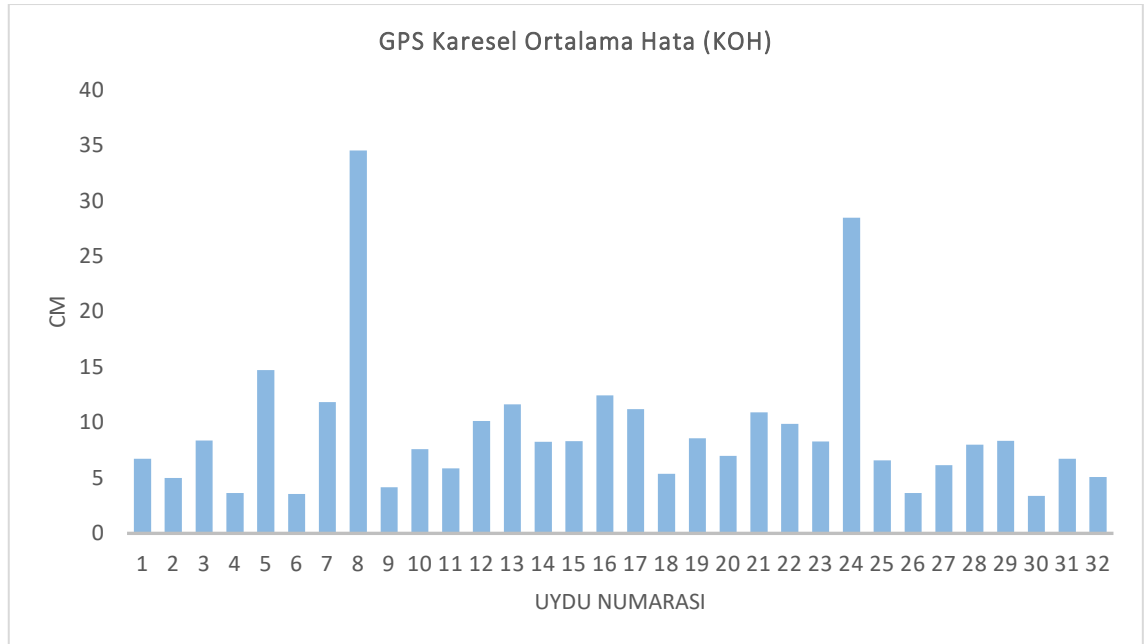
Yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü üzere tek uydu yöntemindeki standart sapma seçilen referans uyduya göre değişmiştir. Sonuçlar ayrıca, bazı uyduların referans uydu olarak kullanılmasının, sonuçları ortalama değerden önemli derecede saptırdığını göstermiştir. Sonuçlardaki bu sapmalar GPS ve Galileo’da diğer uydu sistemlerine göre oldukça azdır. GBM-WUM arasındaki saat farkı diğer uydu sistemlerine göre BDS-2’de çok daha yüksektir. Bu yüzden BDS-2’de düşey ölçek 25 cm olarak ayarlanmıştır.

5.2. Tek Uydu Yönteminde Referans Uydu Seçimi İçin Araştırılan Kriterler

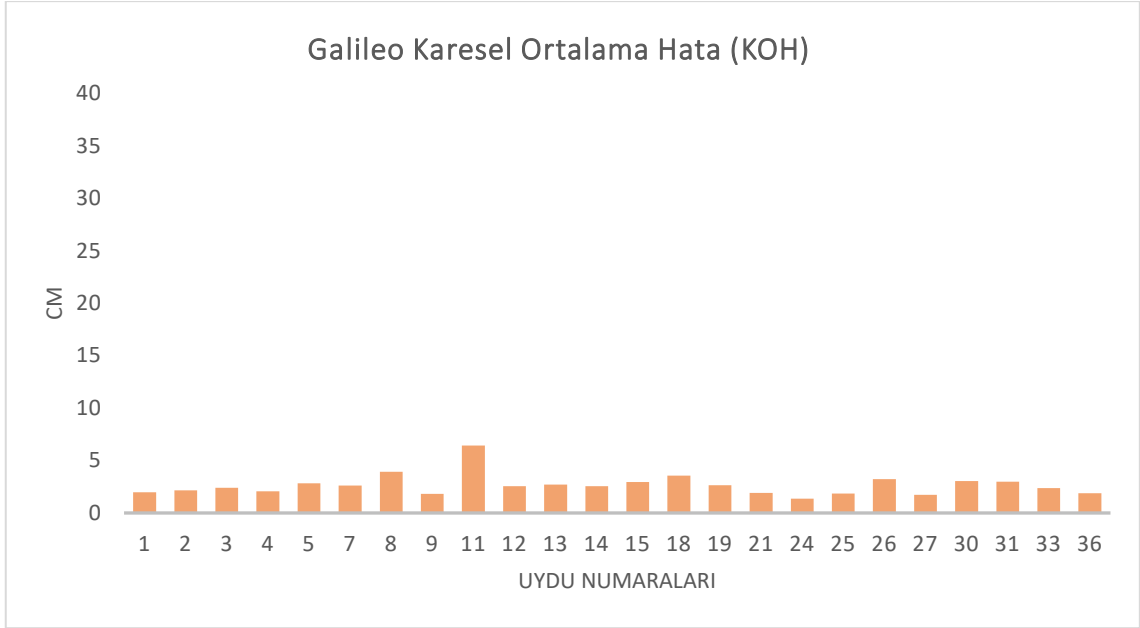
Tek uydu yöntemindeki bu sapmaların referans seçilen uydunun kararlılığıyla bağlantılı olup olmadığını araştırmak amacıyla her bir uydunun karesel ortalama hatası, hadamard sapması, uyuşumsuz ölçü oranı ve frekans doğruluğu araştırılmıştır. GBM ve WUM analiz merkezleri için tüm GNSS sonuçları ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tek uydu yönteminde referans uydu seçimi için araştırılan kriterler (yani karesel ortalama hata, uyuşumsuz ölçü oranı, hadamard varyans ve frekans doğruluğu) GBM ve WUM analiz merkezleri için karşılaştırıldığında sonuçların birbirine yakın olduğu görülmüştür. GBM ve WUM sonuçları birbirine çok yakın olduğu için çalışmada sadece GBM sonuçları verilmiştir.

5.2.1. Karesel Ortalama Hata

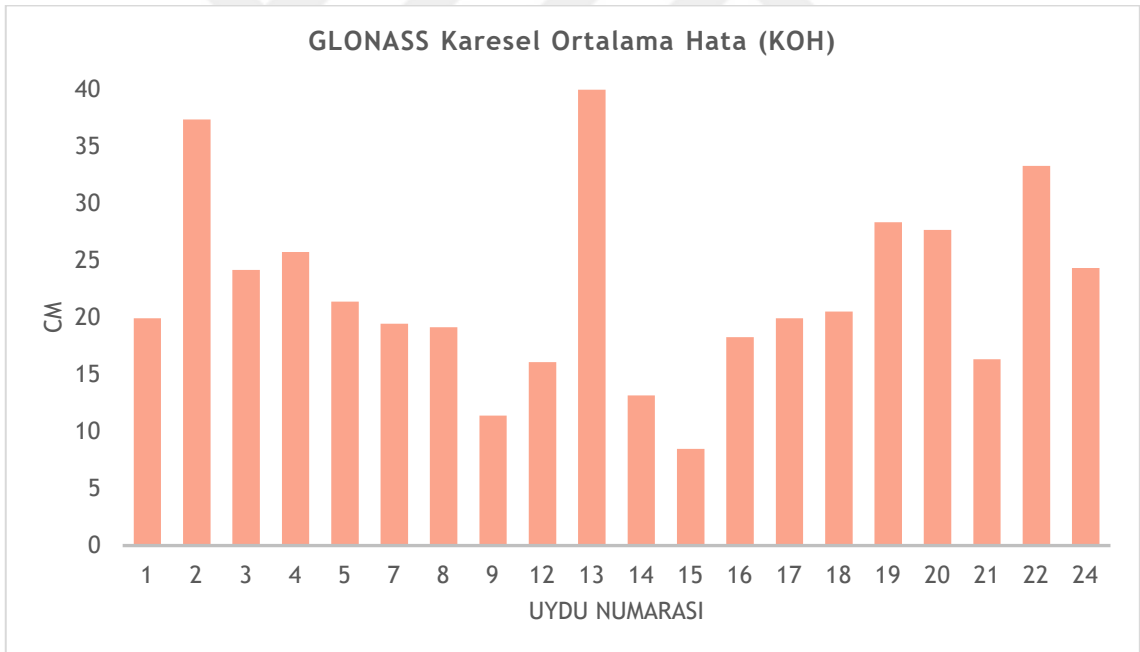
Şekil 5.6- 5.10 GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için uydu saatlerinin karesel ortalama hata değerlerini göstermektedir.



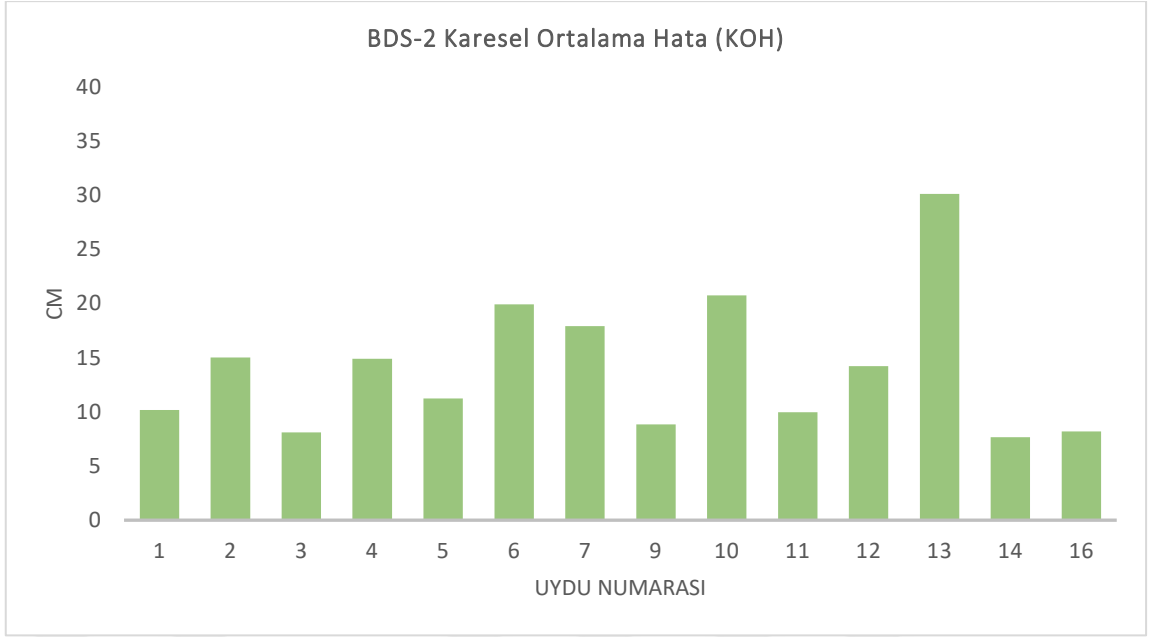
Şekil 5.6. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için GPS uydu saatlerinin karesel ortalama hata değerleri



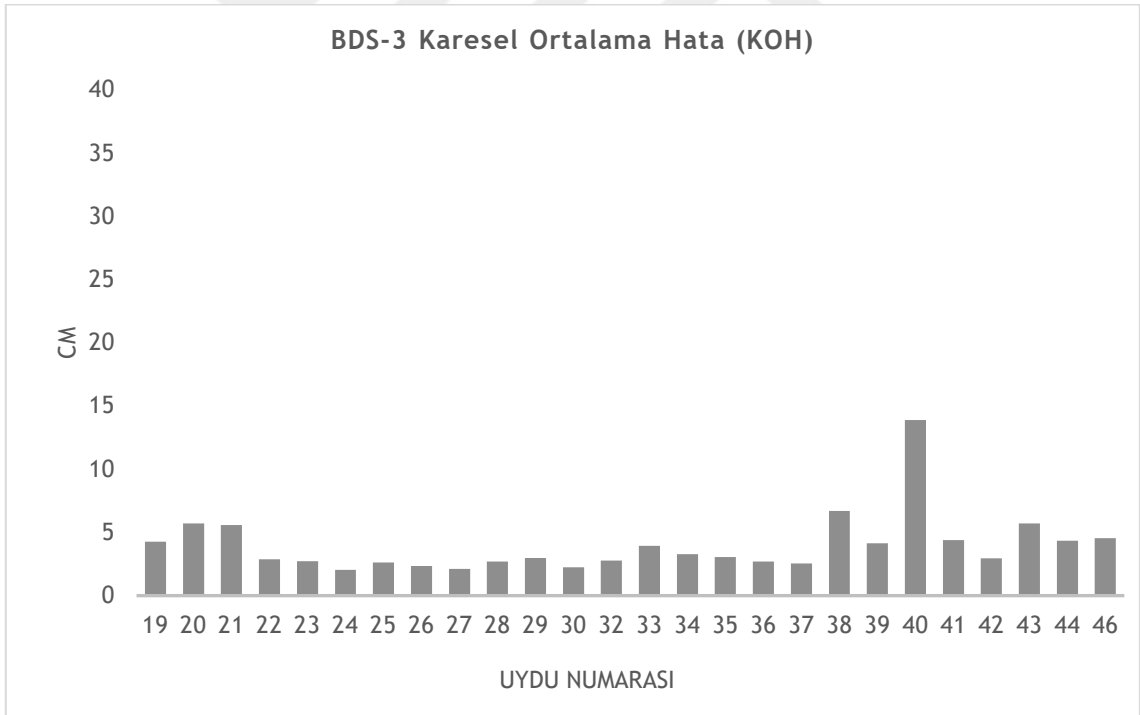
Şekil 5.7. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için Galileo uydu saatlerinin karesel ortalama hata değerleri



Şekil 5.8. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için GLONASS uydu saatlerinin karesel ortalama hata değerleri



Şekil 5.9. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için BDS-2 uydu saatlerinin karesel ortalama hata değerleri



Şekil 5.10. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için BDS-3 uydu saatlerinin karesel ortalama hata değerleri

Karesel ortalama hata değerlerine bakıldığında sonuçlar tüm GNSS sistemleri için farklıdır. GPS ve GLONASS uyduları diğer uydu sistemlerine kıyasla daha yüksek karesel ortalama hata değerine sahiptir. Karesel ortalama hata değerinin yüksek olması

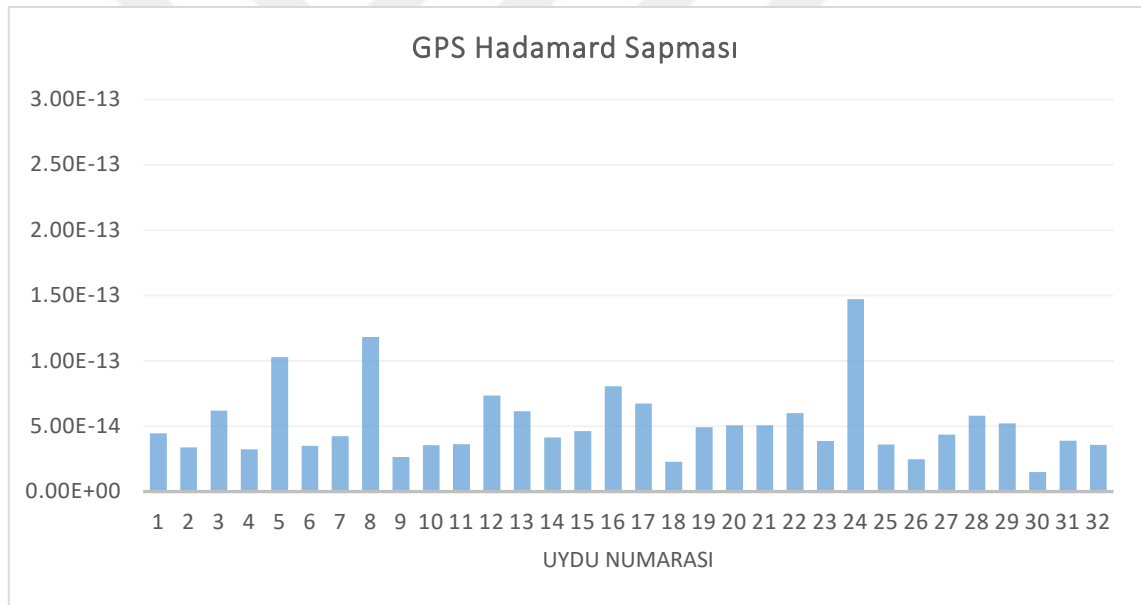
uydu saat duyarlılığının düşük olması anlamına gelmektedir. Galileo uyduları tüm GNSS'ler içinde en düşük karesel ortalama hata değerine sahip uydulardır. Bunun nedeni, uydu sistemlerinin içerdikleri saat türlerinde ortaya çıkan farklılıklardır. GNSS uydularında sezyum (Cs), rubidyum (Rb) ve pasif hidrojen maser (PHM) olmak üzere üç tip atom saati türü kullanılmaktadır. GNSS uydularından GPS saatleri rubidyum ve sezyum, GLONASS sezyum (Cs), Beidou rubidyum (Rb) ve pasif hidrojen maser (PHM), Galileo rubidyum ve pasif hidrojen maserleri kullanmaktadır (Hollberg vd., 2021). Atomik saatlerden en zayıf kararlılığa sahip olanı sezyumdur (Cao vd., 2021). Dolayısıyla GLONASS ve bazı GPS uydularında (örneğin; G08, G24) sezyum (Cs) kullanıldığı için diğer uydulara kıyasla karesel ortalama hatası yüksek çıkmıştır. En yüksek kararlılığa sahip olan atomik saat PHM'dir. Tüm BDS-3 ve Galileo uydularının birçoğu PHM'ye sahip olduğundan, bunların karesel ortalama hatası GPS, GLONASS ve BDS-2'ye kıyasla daha düşüktür. BDS-2 uyduları ise rubidyum saatine sahiptir (Montenbruck vd., 2025).

Tek uydu yönteminin sonuçları ve karesel ortalama hata sonuçları incelendiğinde GPS sisteminde 08 numaralı uydu en yüksek yani 35 cm civarında bir karesel ortalama hata değerine sahipken, tek uydu yönteminde saat farkı diğer uydulara göre düşüktür. 30 numaralı uydunun karesel ortalama hatası 3.4 cm olup diğer uydulara kıyasla en düşük olduğu halde tek uydu yönteminde saat farkı diğer uydularla yakındır. Galileo uyduları incelendiğinde 11 numaralı uydunun karesel ortalama hatası 6.4 cm olup diğer uydulara göre yüksektir, aynı zamanda tek uydu yönteminde saat sapması da 3.9 cm olup en yüksek seviyededir. Ancak 08 numaralı uyduya bakıldığında, karesel ortalama hata değerinin maksimum değerden sonra (6.4 cm) en yüksek ikinci uydu olduğu, tek uydu yöntemiyle elde edilen saat farkının ise minimum değere (1.9 cm) yakın olup büyük ölçüde diğer uydularla uyumlu olduğu görülmüştür. GLONASS uyduları incelendiğinde 13 numaralı uydunun karesel ortalama hatası en yüksektir (40 cm civarında) ancak tek uydu yönteminde saat farkının maksimum (6.9 cm) ve minimum (3.6 cm) değere göre orta seviyelerde olduğu görülmüştür. BDS-2' de 13 numaralı uydunun karesel ortalama hatası uydular arasında en yüksektir (30 cm) ama tek uydu yönteminde saat farkı minimum değere (7.7 cm) yakın olup birçok uydudan daha düşüktür. 05 numaralı uydunun saat sapması maksimum değerinde (19.6 cm) olduğu halde, karesel ortalama hatası birçok uydudan daha düşüktür. BDS-3' te 40 numaralı uydunun karesel ortalama hatası maksimum seviyede yani 14 cm civarında olduğu halde tek uydu yönteminde saat sapması minimum (4.3 cm) ve maksimum (10 cm civarında) değerlere göre orta seviyelerde olup diğer uydularla yakındır. Tüm GNSS sonuçlarına göre uyduların

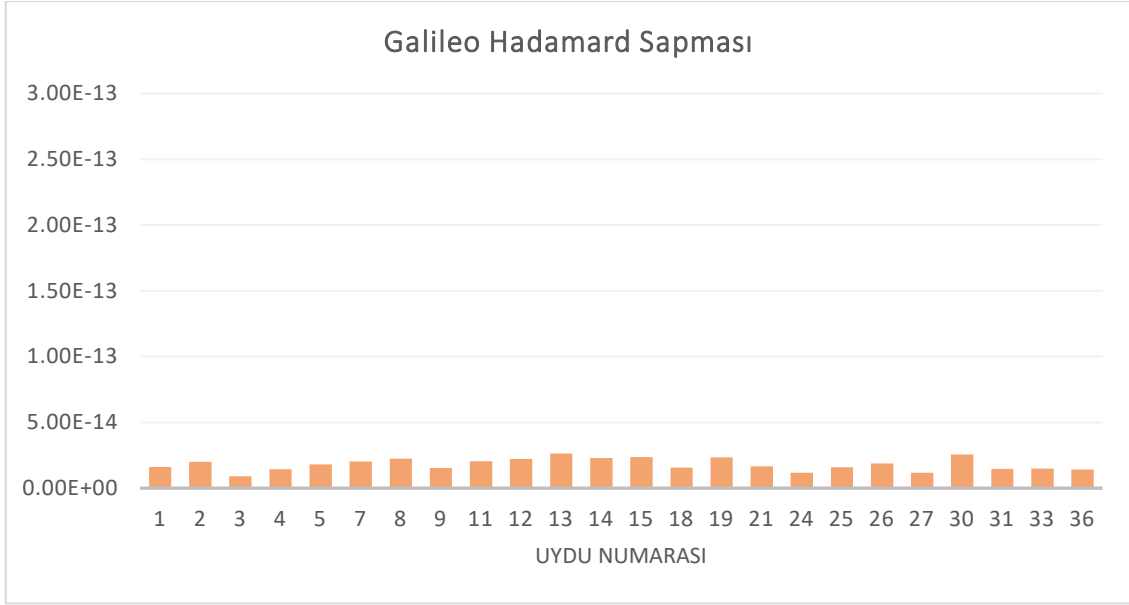
çoğunda karesel ortalama hata ve tek uydu yöntemindeki saat farkları arasında bir korelasyon olduğu görülmemektedir. Yani tek uydu yönteminde referans uydu seçimi için karesel ortalama hata değerleri incelendiğinde yüksek kararlılığa veya düşük kararlılığa sahip referans uydunun seçilmesinin, tek uydu yöntemindeki saat farklılıklarını doğrudan etkilemediği kanıtlanmıştır.

5.2.2. Hadamard Sapması

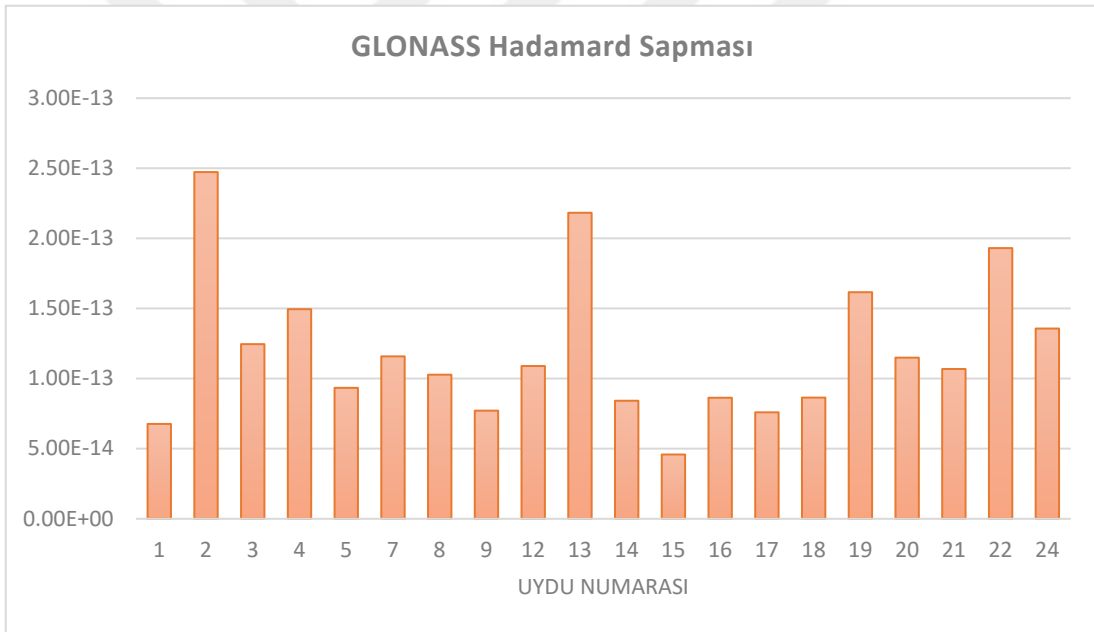
Hadamard sapmasının sonuçları da karesel ortalama hata değerlerine benzerdir. Daha küçük bir hadamard sapması değeri, daha kararlı ve daha hassas bir saati göstermektedir. Şekil 5.11- 5.15, 24.01.2021 tarihli güne ait GBM analiz merkezi için uydu saatlerinin hadamard sapmasını göstermektedir.



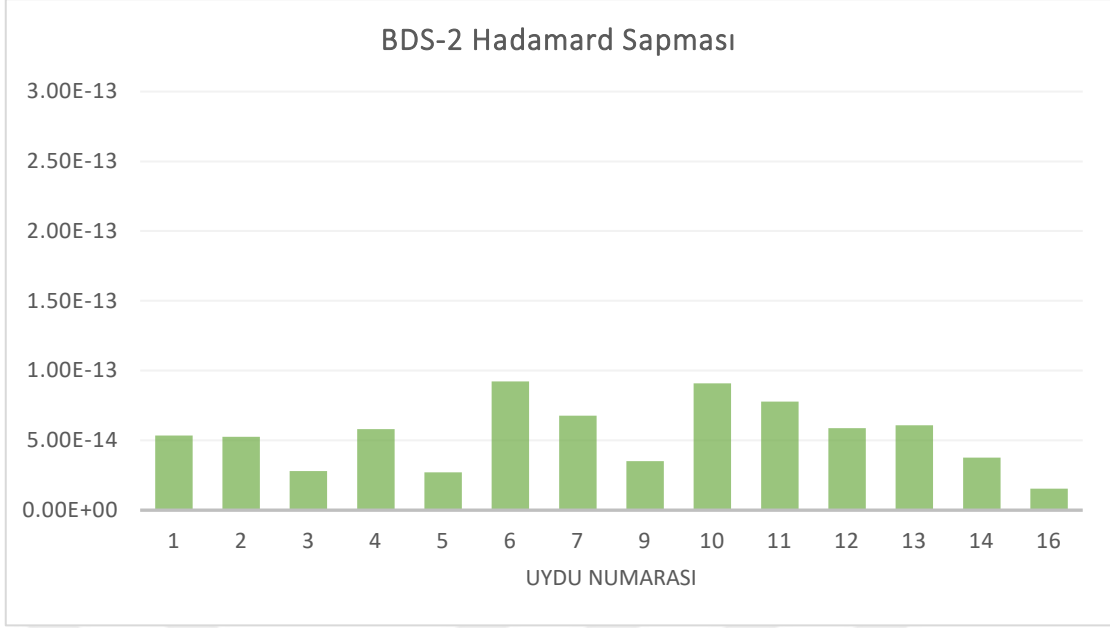
Şekil 5.11. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için GPS uydularının hadamard sapmaları



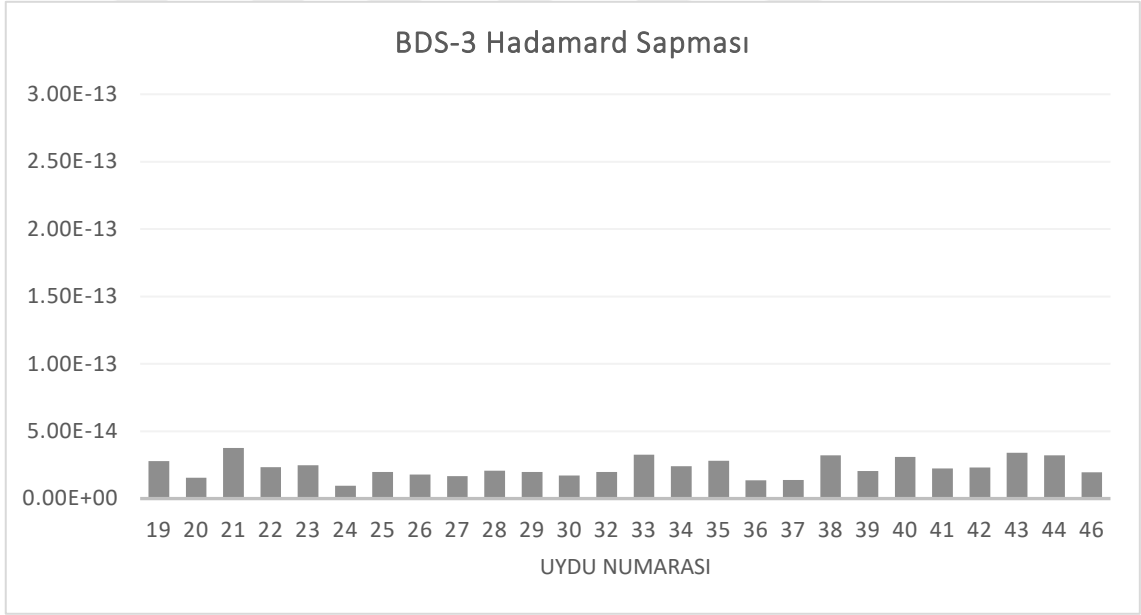
Şekil 5.12. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için Galileo uyduların hadamard sapmaları



Şekil 5.13. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için GLONASS uydularının hadamard sapmaları



Şekil 5.14. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için BDS-2 uydularının hadamard sapmaları



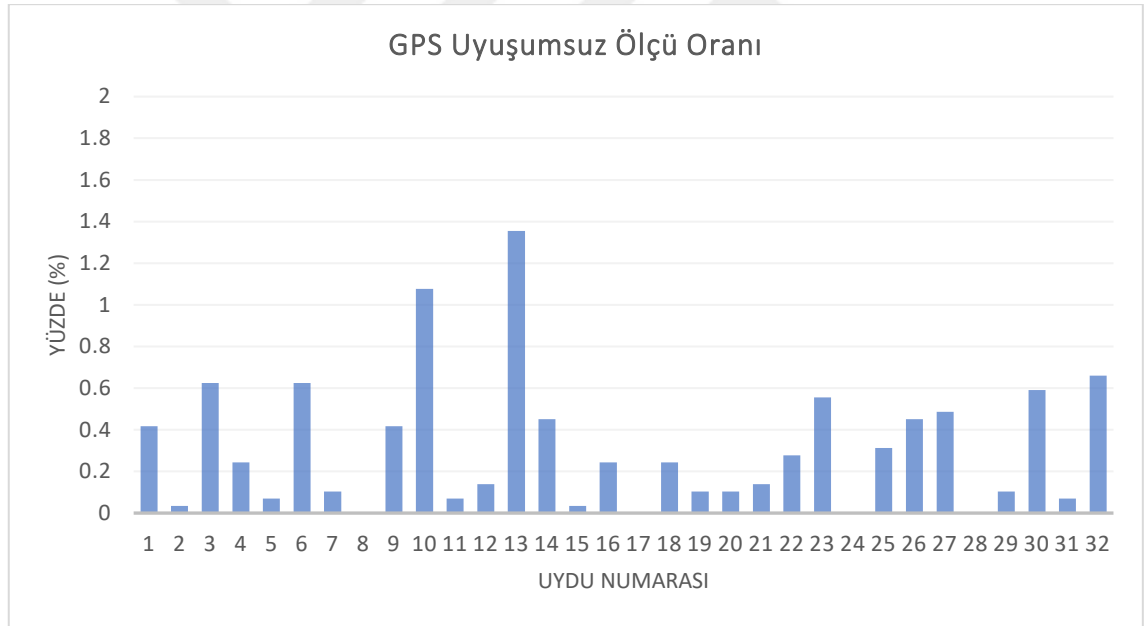
Şekil 5.15. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli gün için BDS-3 uydularının hadamard sapmaları

Tek uydu yönteminde GPS G24 uydusu referans uydu olarak alınırken en büyük saat farkı hesaplandığından, GPS G24 uydusu hadamard sapmasını ve frekans doğruluğunu araştırmak için örnek olarak alınmıştır. GPS G24 uydusu için hadamard sapması 1.47×10^{-13} civarında hesaplanmıştır, diğer GPS uyduları için ortalama değer 4.89×10^{-14} olarak hesaplanmıştır. Yani grafiklerden de görüldüğü üzere G24 uydusunun hadamard sapması diğer GPS uydularına göre daha büyüktür. GNSS'ler içinde uydular arasındaki hadamard sapmalarının farklılıkları GLONASS ve BDS-2 için daha

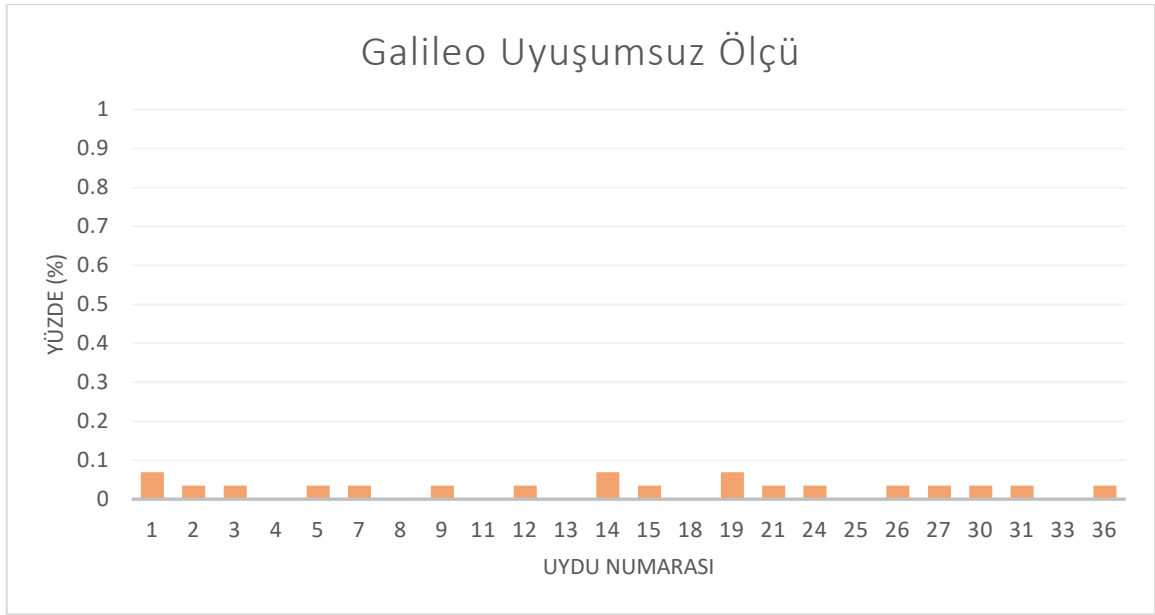
belirgindir. Genel olarak tüm uydu sistemlerinin hadamard sapması incelendiğinde Galileo ve BDS-3 uydularının hadamard sapması diğer uydulara göre daha düşüktür. Bu yüzden Galileo ve BDS-3 uyduları için düşey ölçek 4×10^{-14} olarak ayarlanmıştır. GPS, GLONASS ve BDS-2 uyduları için ise düşey ölçek 3×10^{-13} olarak ayarlanmıştır. Frekans doğruluğu sonuçları incelendiğinde, karesel ortalama hata ve hadamard sapması açısından herhangi bir korelasyon bulunamamıştır. Bu nedenle, çalışmanın geri kalanı için frekans doğruluğunun sonuçları atlanmıştır.

5.2.3. Uyuşumsuz Ölçü Oranı

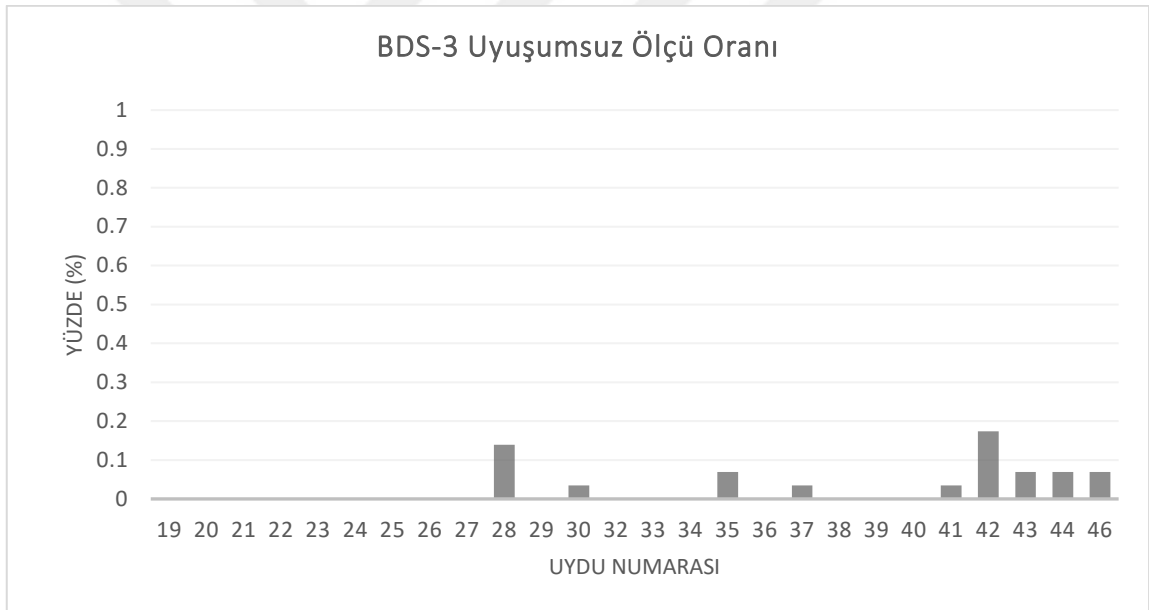
Uyuşumsuz ölçü oranı sonuçları da karesel ortalama hata ve hadamard varyans sonuçlarına benzerdir. Şekil 5.16-5.18, 24.01.2021 tarihli güne ait GBM analiz merkezi için uydu saatlerinin uyuşumsuz ölçü oranları verilmiştir.



Şekil 5.16. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli güne ait GPS uydu saatlerinin uyuşumsuz ölçü oranı



Şekil 5.17. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli güne ait Galileo uydu saatlerinin uyuşumsuz ölçü oranı



Şekil 5.18. GBM analiz merkezi 24.01.2021 tarihli güne ait BDS-3 uydu saatlerinin uyuşumsuz ölçü oranı

Grafiklere bakıldığında GPS G24 ve G08 uydularının uyuşumsuz ölçü oranı %0 iken, diğer GPS uydularının uyuşumsuz ölçü oranları daha yüksektir. Tüm GNSS'ler arasında uyuşumsuz ölçü oranı en yüksek olan uydu sistemi GPS olduğundan GPS için düşey ölçek %2 olarak ayarlanmıştır. Galileo uydularına bakıldığında E14 ve E19 uydularının uyuşumsuz ölçü oranı diğer uydulara göre yüksek olmasına rağmen tek uydu yönteminde saat farkı diğer uydularla yakındır. BDS-3 uydularında C42 uydusunun uyuşumsuz ölçü oranı diğer uydulara göre fazladır. Ancak tek uydu yönteminde saat farkı

çoğu uyduyla yakındır. GLONASS ve BDS-2 uydularının uyuşumsuz ölçü oranları her uydu için %0 olduğundan bu uydu sistemlerinin grafiklerine yer verilmemiştir.

5.2.4. Karesel Ortalama Hata ve Hadamard Sapması Karşılaştırması

Tablo 5.1, her bir GNSS için karesel ortalama hata değerleri ve hadamard sapmasının bir haftalık GBM saat verileri kullanılarak hesaplanan ortalama değerlerini göstermektedir. GBM ve WUM sonuçları birbirine çok yakın olduğundan, sadece GBM'den elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Tablo 5. 1. GBM analiz merkezi karesel ortalama hata ve hadamard sapması sonuçları

Uydu Sistemi	Karesel ortalama hata (cm)	Hadamard sapması
GPS	9.6	5.47×10^{-14}
GLONASS	24.0	12.50×10^{-14}
Galileo	3.0	1.80×10^{-14}
BDS-2	12.0	4.87×10^{-14}
BDS-3	5.1	2.49×10^{-14}

Tablo 5.1.'den görüldüğü gibi, uydu saatlerinin karesel ortalama hatası ve hadamard sapması güçlü bir korelasyon göstermektedir. Yani karesel ortalama hata değerinin düşük olduğu uydu sisteminde hadamard sapma değeri de düşüktür.

5.3. Çoklu Uydu Yöntemi

Çoklu uydu yönteminde referans uydu seçme önkoşulu yoktur. Tüm uydular referans olarak seçilmektedir. Bu yüzden çoklu uydu yönteminde aynı güne ait aynı uydu sistemi içinde yer alan tüm uyduların standart sapması eşittir. Tablo 5.2.'de farklı günlere ait GNSS'lerin çoklu uydu yöntemiyle elde edilen standart sapma sonuçları verilmiştir.

Tablo 5. 2. Çoklu uydu yöntemi standart sapma sonuçları (birim: cm)

Tarih	GPS	GLONASS	Galileo	BDS-2	BDS-3
24.01.2021	1.9	3.1	1.6	7.4	3.9
25.01.2021	1.7	3.9	2	7.2	5.3
26.01.2021	2	3.1	1.9	7.8	4.8
27.01.2021	2.1	2.6	1.8	6.8	4.3
28.01.2021	1.9	3.8	1.9	7.2	4
29.01.2021	1.4	3.5	1.5	6.6	3.6
30.01.2021	1.5	4.3	2.6	8.4	3.9

Tablo 5.2.'den görüldüğü gibi çoklu uydu yönteminde standart sapması her gün için en düşük olan uydu sistemi GPS'dir. BDS-2 uyduları diğer uydu sistemleriyle karşılaştırıldığında en yüksek standart sapmaya sahip uydulardır.

Tablo 5.3, her bir GNSS için tek uydu ve çoklu uydu yöntemlerinin bir haftalık saat verilerini kullanarak saat farklılıklarının ortalama standart sapmasını göstermektedir.

Tablo 5. 3. Tek uydu ve çoklu uydu yöntemlerinin standart sapma sonuçları (birim: cm)

Uydu Sistemi	Tek Uydu	Çoklu Uydu
GPS	2.6	1.8
GLONASS	5.2	3.5
Galileo	2.8	1.9
BDS-2	11.0	7.3
BDS-3	6.4	4.3

Günlük tek uydu sonuçları hesaplanırken, her uydu her GNSS için bir referans uydu olarak alınmıştır. Ardından, bir haftalık sonucun ortalaması hesaplanmıştır. Çoklu uydu sonuçları için, tüm uydular tek bir adımda referans uydu olarak seçildiğinden, her bir GNSS için günlük bir saat farkı sonucu hesaplanmıştır.

Sonuçlardan görüldüğü gibi, çoklu uydu yöntemi, her GNSS için tek uydu yöntemine kıyasla her zaman daha küçük bir saat farkına sahiptir, bu da analiz merkezlerine özgü saat veri farklılıklarının (standart sapma açısından) çoklu uydu yöntemiyle daha iyi giderilebileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca GBM ve WUM analiz merkezleri arasındaki en büyük saat farklılıklarının BDS uydularında olduğu ortaya çıkmıştır

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada, saat karşılaştırması için tek uydu yöntemi ve çoklu uydu yöntemi, GBM ve WUM analiz merkezlerinden alınan bir haftalık uydu saat ürünleri kullanılarak araştırılmıştır. Tek uydu yönteminde zaman ölçeği farkını ortadan kaldırmak için referans uydu seçmek gereklidir. Tek uydu yönteminde referans uydu seçiminin uydu kalitesi ile bağlantısı olup olmadığını araştırmak amacıyla dört kriter (karesel ortalama hata, hadamard varyans, uyuşumsuz ölçü oranı ve frekans doğruluğu) her bir uydu için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Sonuçlar, seçilen referans uydunun kararlılık kriterlerinin saat farklılıkları üzerinde doğrudan bir etkisi olmadığını göstermiştir. Bu nedenle, tek uydu yönteminde daha küçük saat farkları için en yüksek hassasiyete sahip uyduyu referans uydu olarak seçmek gibi bir ön koşul gerekli değildir. Ayrıca frekans doğruluğu sonuçlarının hadamard varyans ve karesel ortalama hata sonuçlarıyla herhangi bir bağlantısının bulunmadığı tespit edilmiştir. Tek uydu yöntemindeki saat farklılıkları, seçilen referans uyduya bağlıdır. Seçilen bazı referans uydular için, saat farklarının standart sapması, seçilen diğer referans uydular arasında oldukça yüksektir. Tek uydu yönteminde saat farklarının standart sapması GPS ve Galileo uydularında diğer uydulara göre düşüktür. BDS-2 uydularında ise en yüksektir.

Tek uydu yöntemi ve çoklu uydu yöntemi karşılaştırıldığında, çoklu uydu yönteminin saat farklarının her gün için tek uydu yöntemine ve GNSS sistemine göre daha küçük olduğu görülmüştür. Bu da analiz merkezlerine özgü saat verisi farklılıklarının, standart sapma açısından çoklu uydu yöntemiyle daha iyi giderilebileceğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, çoklu uydu yönteminde referans uydu seçme zorunluluğu ortadan kalkmıştır.

Sonuç olarak çoklu uydu yöntemi her zaman saat farklarının en küçük standart sapmasını vermektedir ve çoklu uydu yönteminin referans uydu saat hatalarının yan etkilerini ve saat hassasiyetine etkisini azaltabileceğini kanıtlamaktadır.

7. KAYNAKLAR

- Alkan, R. M., İlçi, V., & Ozulu, M. (2014). PPP Yönteminde GPS ve GLONASS Uydularının Kullanımının Nokta Konum Doğruluğuna Etkisinin Araştırılması. İçinde *Electronic Journal of Map Technologies* (C. 6, Sayı 2). www.teknolojikarastirmalar.com
- Bülbül, S., İnal, C., & Bilgen, B. (2022). Mevsimsel Değişimlerin Hassas Nokta Konumlamaya Etkisi. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 10(2), 274-286. <https://doi.org/10.36306/konjes.1024445>
- Cao, Y., Huang, G., Xie, W., Xie, S., & Wang, H. (2021). Assessment and comparison of satellite clock offset between BeiDou-3 and other GNSSs. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 56(2), 303-319. <https://doi.org/10.1007/s40328-021-00334-8>
- Chen, Q., Song, S., & Zhou, W. (2021). Accuracy analysis of gnss hourly ultra-rapid orbit and clock products from shao ac of igmas. *Remote Sensing*, 13(5), 1-18. <https://doi.org/10.3390/rs13051022>
- Dow, J. M., Neilan, R. E., & Gendt, G. (2005). The International GPS Service: Celebrating the 10th anniversary and looking to the next decade. *Advances in Space Research*, 36(3), 320-326. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2005.05.125>
- Farhan H. (2021). Farklı Analiz Merkezlerinden Yayınlanan Rapid Ve Ultra-Rapid Ürünlerinin Hassas Nokta Konumlama (PPP) Performansının Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ,Konya ,19-20.
- Guo, J., Wang, C., Chen, G., Xu, X., & Zhao, Q. (2023). BDS-3 precise orbit and clock solution at Wuhan University: status and improvement. *Journal of Geodesy*, 97(2), 15. <https://doi.org/10.1007/s00190-023-01705-5>

- Guo, J., Xu, X., Zhao, Q., & Liu, J. (2016). Precise orbit determination for quad-constellation satellites at Wuhan University: strategy, result validation, and comparison. *Journal of Geodesy*, 90(2), 143-159.
<https://doi.org/10.1007/s00190-015-0862-9>
- Hauschild, A., Montenbruck, O., & Steigenberger, P. (2013). Short-term analysis of GNSS clocks. *GPS Solutions*, 17(3), 295-307.
<https://doi.org/10.1007/s10291-012-0278-4>
- Hollberg, L., Morton, J., Van Diggelen, F., Spilker, J. J., & Parkinson, B. W. (2021). 47 Atomic Clocks for GNSS (C. 2).
- Hou, Y., Wang, H., Wang, J., Ma, H., Ren, Y., Li, P., & Wang, Y. (2022). Studies and Analysis of Combining BDS-3/GNSS Ultra-Rapid Orbit Products from Different IGS Analysis Centers. *Remote Sensing*, 14(23).
<https://doi.org/10.3390/rs14236122>
- İnal, C., Bilgen, B., Bülbül, S., Başbük, M., Üniversitesi, K. T., Ve Doğa, M., Fakültesi, B., Bölümü, H. M., & Konya, T. (2022). Farklı uydu sistemi kombinasyonlarının gerçek zamanlı hassas nokta konumlamaya etkisi The effect of different satellite system combinations on real-time precise point positioning. *Bilim. Derg. / NOHU J. Eng. Sci.*, 11(1), 109-115.
<https://doi.org/10.28948/ngmuh.996018>
- Jiao, G., & Song, S. (2022). High-Rate One-Hourly Updated Ultra-Rapid Multi-GNSS Satellite Clock Offsets Estimation and Its Application in Real-Time Precise Point Positioning. *Remote Sensing*, 14(5).
<https://doi.org/10.3390/rs14051257>
- Johnston, G., Riddell, A., & Hausler, G. (2017). The Internati 33. The International GNSS Service (C. 33, Sayı 1).
- Konukseven C., Öğütçü S., & Alçay S. (2022). GNSS Frequency Availability Analysis. *Turkish Journal of Engineering*, 6(1), 87-94.

<https://doi.org/10.31127/tuje.870620>

Kouba, J. (2009). A Guide To Using International GNSS Service (IGS) Products.

Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., & Schuh, H. (2015). Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo. *Journal of Geodesy*, 89(6), 607-635.
<https://doi.org/10.1007/s00190-015-0802-8>

Li, X., Wang, Q., Wu, J., Yuan, Y., Xiong, Y., Gong, X., & Wu, Z. (2022). Multi-GNSS products and services at iGMAS Wuhan Innovation Application Center: strategy and evaluation. *Satellite Navigation*, 3(1).
<https://doi.org/10.1186/s43020-022-00081-3>

Lynn, S., & App, C. B. (2009). An Investigation Into The Accuracy Of Single Frequency Precise Point Positioning (PPP).

Montenbruck, O., Steigenberger, P., & Hauschild, A. (2015). Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. *GPS Solutions*, 19(2), 321-333.
<https://doi.org/10.1007/s10291-014-0390-8>

Montenbruck, O., & Steigenberger, P. (2025). The 2024 GPS accuracy improvement initiative. *GPS Solutions*, 29(1), 1-12.

Negusini, M., Petkov, B. H., Tornatore, V., Barindelli, S., Martelli, L., Sarti, P., & Tomasi, C. (2021). Water vapour assessment using GNSS and radiosondes over polar regions and estimation of climatological trends from long-term time series analysis. *Remote Sensing*, 13(23).
<https://doi.org/10.3390/rs13234871>

Nie, Z., Xu, X., Wang, Z., & Du, J. (2021). Initial assessment of BDS PPP-B2b service: Precision of orbit and clock corrections, and PPP performance. *Remote Sensing*, 13(11).
<https://doi.org/10.3390/rs13112050>

Ogutcu, S., & Farhan, H. T. (2022). Assessment of the GNSS PPP performance using ultra-rapid and rapid products from different analysis centres. *Survey Review*, 54(382), 34-47.

<https://doi.org/10.1080/00396265.2020.1860869>

Rahmanlar, S. T. (2019). Doğru Hız Kestirimi İçin Aylık GPS Kampanyalarının Performansı Üzerine Bir İnceleme, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Shakor A. (2022). Gözlem Aralığının GPS, Glonass, Galileo ve Beidou Statik PPP Üzerindeki Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya ,12.

Shi, J., Xu, C., Li, Y., & Gao, Y. (2015). Impacts of real-time satellite clock errors on GPS precise point positioning-based troposphere zenith delay estimation. *Journal of Geodesy*, 89(8), 747-756.

<https://doi.org/10.1007/s00190-015-0811-7>

Şahin D. (2019). Yükseklik Değişiminin Hassas Nokta Konumlamaya Etkisi.

Turgut M. (2019). Gerçek Zamanlı Hassas Nokta Konumlama (RT-PPP) Yöntemi Performansının İncelenmesi ,Yüksek Lisans Tezi ,Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü ,Konya, 5-6 ,(26).

Uçarlı, A. C., Demir, F., Erol, S., & Alkan, R. M. (2021). Farklı GNSS Uydu Sistemlerinin Hassas Nokta Konumlama (PPP) Tekniğinin Performansına Etkisinin İncelenmesi. *Geomatik*, 6(3), 247-258.

<https://doi.org/10.29128/geomatik.779420>

URL 1. (2023, Temmuz 11). <https://ggos.org/item/igs/>

URL 2. (2023, Temmuz 11). <https://www.haritaciyiz.com/igs/>

URL 3. (2024, Kasım 14). <https://network.igs.org/>

URL 4. (2024, Aralık 1). https://www.researchgate.net/figure/Detrended-clock-offsets-of-satellite-G072-across-the-Cesium-red-to-Rubidium-blue_fig2_386464328

Wang, Z., Li, Z., Wang, L., Wang, X., & Yuan, H. (2018). Assessment of multiple GNSS real-Time SSR products from different analysis centers, (2). ISPRS International Journal of Geo-Information, 7(3).
<https://doi.org/10.3390/ijgi7030085>

Xu, X., Li, J., Guo, J., Yang, C., & Zhao, Q. (2024). Near real-time multi-GNSS orbits, clock and observable-specific biases at Wuhan University. GPS Solutions, 28(4), 191.
<https://doi.org/10.1007/s10291-024-01732-5>

Yao, Y., He, Y., Yi, W., Song, W., Cao, C., & Chen, M. (2017). Method for evaluating real-time GNSS satellite clock offset products, (1). İçinde GPS Solutions (C. 21, Sayı 4, ss. 1417-1425). Springer Verlag.
<https://doi.org/10.1007/s10291-017-0619-4>

Yuan, Z., Cai, C., Pan, L., & Kuang, C. (2020). An improved multi-satellite method for evaluating real-time bds satellite clock offset products. Remote Sensing, 12(21), 1-18.
<https://doi.org/10.3390/rs12213638>

Zhang, S., Du, S., Li, W., & Wang, G. (2019). Evaluation of the gps precise orbit and clock corrections from madoca real-time products. Sensors (Switzerland), 19(11).
<https://doi.org/10.3390/s19112580>

Zhang, X., Li, X. X., & Guo, F. (2011). Satellite clock estimation at 1 Hz for realtime kinematic PPP applications. GPS Solutions, 15(4), 315-324.
<https://doi.org/10.1007/s10291-010-0191-7>

Zhao, W., Dai, X., Lou, Y., Peng, Y., & Xu, X. (2023). Evaluation of strategies for the ultra-rapid orbit prediction of BDS GEO satellites. *Geo-Spatial Information Science*, 26(1), 16-30.

<https://doi.org/10.1080/10095020.2022.2071177>

Zhao, Y., Cheng, C., Li, L., Wang, R., Liu, Y., Li, Z., & Zhao, L. (2021). BDS signal-in-space anomaly probability analysis over the last 6 years. *GPS Solutions*, 25(2).

<https://doi.org/10.1007/s10291-021-01097-z>

Zumberge, J. F., Heflin, 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. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 5005-5017.

<https://doi.org/10.1029/96jb03860>