



Proximity monitoring of collocated satellites based on real time measurement

İbrahim Öz *

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Mustafa Kemal Mahallesi, 2078. Sokak No:4, 06510, Çankaya, Ankara, Türkiye

Highlights:

- A novel approach has been introduced for measuring the distances among collocated satellites
- The real-time measurement of inter-satellite distances mitigates errors, including propagation discrepancies
- Operators can leverage RTM to enhance the reliability of orbital operations.

Keywords:

- Collocated satellite
- Orbit determination
- Position measurement
- Satellite minimum distance
- Proximity

Article Info:

Research Article

Received: 28.09.2022

Accepted: 19.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1181262

Correspondence:

Author: İbrahim Öz

e-mail: ioz@epdk.gov.tr

phone: +90 312 201 4000 / 4698

Graphical/Tabular Abstract

Operating multiple collocated satellites within a $\pm 0.10^\circ$ control window demands high precision in orbit determination and the formulation of complex solutions for orbital dynamics. This study introduces a real-time measurement method (RTM) designed for computing inter-satellite distances. Concurrent observations of satellite parameters, facilitate the real-time calculation of satellite's X, Y, and Z positions in space. The proposed RTM method consistently yields exceptional outcomes for collocated satellites. It empowers satellite operators to realistically monitor inter-satellite distances, even when unexpected orbital deviations occur. Table A provides a concise summary of the disparities between real-time measurements (RTM) and an orbital dynamic simulator (ODS) concerning satellite positions (r) and inter-satellite distances. It presents vital statistical metrics, including averages, standard deviations, and root mean square error (RMSE) values. Remarkably low values underscore the alignment between these two methodologies

Table A. Calculated statistical parameters for inter-satellite distances in the context of both methods

	Uydu-A	Uydu-B	Uydu-1	Uydu-2	Uydu-3	Uydu-4	Uydu-A-B	Uydu-1-2	Uydu-1-3	Uydu-1-4
Avg (km)	-0.004	-0.001	0.120	0.125	0.119	0.117	0.068	0.047	-0.071	-0.023
StdDev (km)	0.020	0.020	0.027	0.024	0.023	0.025	0.282	0.253	0.188	0.218
RMSE (km)	0.020	0.020	0.123	0.127	0.121	0.119	0.290	0.257	0.201	0.219

Purpose:

In this investigation, a novel approach is introduced to ascertain the distances between collocated satellites, with the primary objective of enhancing operational safety through error elimination, including propagation-related discrepancies. This innovative method, underpinned by a meticulously crafted algorithm, leverages azimuth, elevation, and range data to derive the X, Y, and Z coordinates of collocated satellites. The outcomes furnish accurate inter-satellite distances devoid of any propagation-induced errors.

Theory and Methods:

Operational precision in managing collocated satellites necessitates a heightened level of orbit determination accuracy. Additionally, the adoption of real-time measurement (RTM) systems to gauge the distances between these satellites has proven to be a triumphant strategy, especially in scenarios where numerous satellites share the same orbital positions, thereby introducing greater complexity into the orbital dynamics equation. The employment of a single station azimuth, elevation, and range methodology in conjunction with RTM has consistently yielded successful outcomes for satellite operations.

Results:

Employing the suggested RTM approach, the calculation of inter-satellite distances was executed for six satellites operating in two distinct orbital positions. The variance between the proposed methodology and the predominantly employed software within the satellite operator community amounts to approximately 0.2 kilometers, underscoring its remarkable success. The proposed RTM consistently delivers outstanding results when applied to collocated satellites.

Conclusion:

This investigation effectively achieved the determination of inter-satellite distances among collocated satellites through the application of the proposed real-time measurement method (RTM). The RTM affords immediate satellite positioning in space, characterized by diminished errors, thereby enhancing the reliability of orbital operations. The utilization of RTM empowers satellite operators to conduct more precise monitoring of the distances between collocated satellites.



Eş konumlu uyduların yakınlaşma izlenmesine gerçek zamanlı mesafe ölçümü tabanlı yaklaşım

İbrahim Öz *¹

Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Mustafa Kemal Mahallesi, 2078. Sokak No:4, 06510, Çankaya, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- A novel approach has been introduced for measuring the distances among collocated satellites
- The real-time measurement of inter-satellite distances mitigates errors, including propagation discrepancies
- Operators can leverage RTM to enhance the reliability of orbital operations

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 28.09.2022

Kabul: 19.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1181262

Anahtar Kelimeler:

Eş konumlu uydular,
yörünge belirleme,
konum ölçümü,
uydular arası asgari mesafe,
yakınlaşma

ÖZ

Uydu işletmecileri birçok uydudan iletilen sinyalin tek bir uydu anteni ile alınabilmesi için çok sayıda haberleşme uydusunu eş konumda (aynı boylamda) işletmektedir. Çok sayıda eş konumlu uydunun $\pm 0,1^\circ$ kontrol penceresi içinde tutulması daha hassas yörünge belirleme ve oldukça karmaşık yörünge dinamiği problemlerinin çözümünü gerektirmektedir. Bu çalışmada eş konumda işletilen uydular arasındaki mesafenin hesaplanmasında gerçek zamanlı ölçüm (GZÖ) yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde uyduların anlık yan, yükseliş ve yer istasyonuna mesafe ölçümleri yapılmış ve o anda uzaydaki konumları X, Y, Z olarak hesaplanmıştır. Önerilen yöntem uydu işletmecilerin yaygın olarak kullandığı yörünge dinamiği benzetim (YDS) yazılımı ile karşılaştırılmıştır. Eş konumda işletilen iki uydu, Uydu-A ve Uydu-B için iki yöntem arasındaki ortalama mesafe farkı 0,068 km ve kök ortalama kare hata (KOKH) 0,290 km olarak görülmektedir. Benzer şekilde eş konumda işletilen dört uydu için yöntemler arası fark KOKH ortalaması 0,225 km'dir. Önerilen GZÖ yöntemi eş konumda işletilen uydular için oldukça başarılı sonuç üretmektedir. Bu yöntem uydularını konumunu anlık olarak verdiği için birçok hatadan arınmış olup ayrıca itki sistemindeki küçük sızıntılar, küçük meteor çarpmaları gibi etkenlerin neden olabileceği beklenmedik yörünge değişikliklerinde içermektedir. Uydu işletmecileri GZÖ yöntemi ile eş konumlu uydular arası mesafeyi daha gerçekçi ve tahmin edilemeyen yörünge bozulmalarını da içerecek şekilde elde edebilecektir.

Proximity monitoring of collocated satellites based on real time measurement

H I G H L I G H T S

- Yan yana konumlanan uydular arasındaki mesafeleri ölçmek için yeni bir yaklaşım getirildi
- Uydular arası mesafelerin gerçek zamanlı ölçümü, yayılma farklılıkları da dahil olmak üzere hataları azaltır
- Operatörler yörünge operasyonlarının güvenilirliğini artırmak için RTM'den yararlanabilirler

Article Info

Research Article

Received: 28.09.2022

Accepted: 19.04.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1181262

Keywords:

Collocated satellites,
orbit determination,
position measurement,
satellite minimum distance,
proximity

ABSTRACT

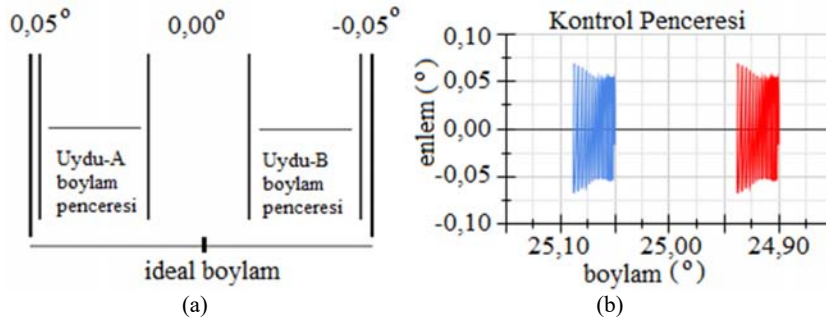
Satellite operators control numerous satellites at the same orbital location to receive various types of signals, primarily television broadcasting signals emitted from many collocated satellites, via a single ground satellite antenna. Operating multiple collocated satellites within a $\pm 0.10^\circ$ control window necessitates more precise orbit determination and an exceedingly complex solution to the orbital dynamics problem. This work proposed a real-time measurement method (RTM) for calculating distances among collocated satellites. The satellite's azimuth, elevation, and range measurements were concurrently performed, and their X, Y, and Z positions in space were computed at the time of measurement. The results of the proposed method were compared with the commonly used software employed by satellite operators. The disparity between the two methods for the mean distance between two collocated satellites, Uydu-A and Uydu-B, is 0.068 kilometers, with an RMSE value of 0.290 kilometers. Similarly, the mean distance differences in RMSE values between the two methods are 0.225 km. for collocated four satellite. The proposed RTM method yields excellent results for collocated satellites. Furthermore, it provides real-time insight into their positions in space with reduced errors compared to the long-term prediction methods commonly employed by satellite operators. This measurement approach encompasses unexpected changes in orbit resulting from unknown external forces, such as propulsion system leaks and micrometeoroid encounters. Consequently, it enables satellite operators to realistically monitor the distances between collocated satellites, even in the presence of unforeseen orbital deviations.

1. Giriş (Introduction)

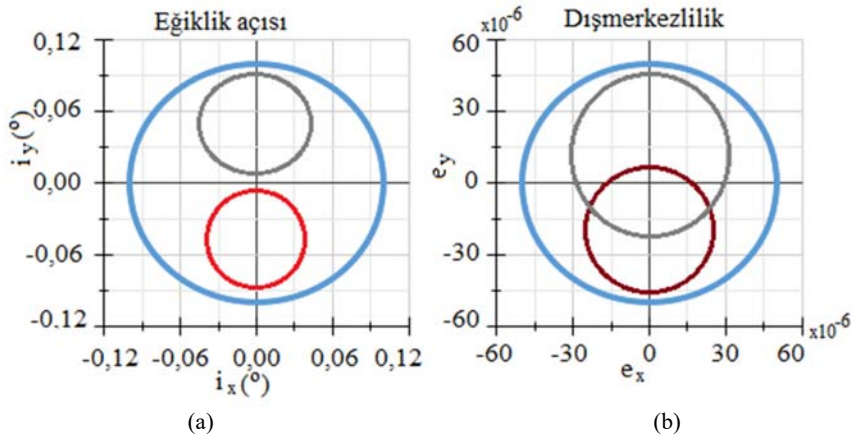
Haberleşme uyduları yerküreden 35786 km yükseklikte, ekvator düzleminde ve yer sabit (yere eş zamanlı, yere eşlenik) yörüngede işletilmektedir. Bu yörüngede işletilen uydular yerden bakıldığında durağan görünmekte ve yerdeki sabit uydu antenleri ile gönderdikleri sinyal alınmaktadır. Haberleşme ihtiyaçlarının artmasıyla yeryüzünde kurulu alıcı sabit uydu anten sistemlerine daha geniş frekans bandında sinyal gönderme ve kapasite genişletme ihtiyacı duyulmaktadır. Uydu üzerinden video servisleri ve veri iletimi başlangıçta C (4-6 GHz) ve Ku (11-14 GHz) frekans aralığını kullanırken ihtiyaca cevap olarak BSS, FSS, yeni Ku, Ka, H ve Q bantlarda ITU tarafından uydu işletmecilerinin koordinasyonuna ve kullanımına açılmıştır. Birçok iletim bandını üzerinde barındıran haberleşme uyduları üretilmesine rağmen, bantların tamamını tek bir haberleşme yudusu üzerine koymak operasyonel risk, yedek bantların tamamının koordinasyon sürecinin tamamlanmış olmaması ve yeni bantların sonradan kullanıma açılması gibi nedenlerle tercih edilmemektedir. Bu haberleşme bantları farklı uyduların yararlı yükleri (haberleşme modülü) üzerine yerleştirilmekte ve genişletilmiş kapasite aynı lokasyonda bulunan (eş konumlu) çok sayıda uydu üzerinden yayın yapmaktadır [1]. Örnek olarak Astra uydularının cazibe merkezi 19.2° Doğu boylamıdır ve buradan $1150'$ 'nin üzerinde televizyon ve radyo yayını dört farklı uydu üzerinden bu lokasyona yönlendirilmiş yeryüzündeki uydu alıcı antenlerine doğrudan gönderilmektedir [2]. Türksat uydularının cazibe merkezi ise 42.0° Doğu boylamıdır ve bu lokasyona yönlendirilen tek bir uydu anteni ile $650'$ 'nin üzerinde TV ve radyo yayını üç farklı uydudan sanki tek bir uydudan sinyal alıyor gibi alınabilmektedir. [3].

Uydu işletmecileri kapasite artırımı talebinin çözümü olarak, aynı konuma (eş konumlama, collocation) birden fazla uydu yerleştirmekte ve çalıştırmaktadır. Böylece ihtiyaca göre talep edilen kapasite arz edilebilmekte, esnek yapı nedeniyle uydular ve diğer lokasyonlar arasında yedeklik sağlanabilmektedir. Ancak, birden fazla uydunun aynı konumda (eş konumlu, collocated) işletilmesi uyduların yörünge hareketlerinin daha titiz takibini ve fiziksel çarpışma riskini önleyecek önlemler almayı gerektirmektedir. Bu konuda SES-Astra adlı uydu işletmecisi altı uyduyu aynı konumda işletmeye başlamış ve daha sonra uydu sayısını sekize çıkarmıştır. Diğer uydu işletmecilerinden Eutelsat, Telesat ve Türksat ise 3 uyduyu eş, aynı konumda işletmektedir [2].

Clark kuşağı da denilen yere eşlenik yörünge kıt kaynak olarak değerlendirilmektedir ve burada işletilen uydular Uluslararası Telekomünikasyon Birliği'nin (ITU, International Telecommunication Union) düzenlemelerine tabi olmaktadır. Bu düzenlemelere göre bir yörüngede işletilmekte olan uydu şebekeleri (kullanım hakları elde edilen frekans bantları) bir veya daha fazla uydu ile gerçekleştirilebilir. Haberleşme uydularının işletilmesi sırasında $\pm 0,1^\circ$ kontrol penceresi içinde tutulması gerekmektedir [4, 5]. İşletme sırasında uydular kontrol penceresinin dışına çıkmamalı, aralarında tanımlanan asgari mesafeden daha fazla yaklaşma olmamalı ve kontrol dışı kalan uydu doğal çekim kuvvetlerinin etkisi ile bölgeyi terk ederken diğer uydulara asgari mesafeden fazla yaklaşmamalı gibi şartlar sağlanarak kontrol manevralarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Eş konumda işletilen uydu sayısının artması problemi daha karmaşık hale gelmekte çok sayıda çözüm ortaya çıkmaktadır [6].



Şekil 1. Eş konumlu iki uydunun boylam paylaşımı metodu (a) şematik gösterim (b) iki haftalık süre içinde uyduların boylam enlem değişimi (Longitude sharing method of two collocated geostationary satellites (a) schematic representation (b) longitude and latitude variation of the two satellites within a two-week period)



Şekil 2. (a) Eş konumlu işletilen iki uydunun eğiklik açısı kontrol penceresi. (b) dışmerkezlilik kontrol penceresi (birimsiz) (a) Inclination control window of two co-located satellites. (b) eccentricity control window (dimensionless))

Eş konumda işletilen uyduların kontrolünde temelde iki farklı metot kullanılmaktadır. Bunlardan birisi boylam paylaşımı metodu diğeri ise dışmerkezlik (eccentricity) ve yörünge eğim açısı (inclination) vektörlerinin kontrol edilmesi metodudur. Boylam paylaşım metodunda Şekil 1a’da görüldüğü gibi $\pm 0,1^\circ$ kontrol penceresi $\pm 0,05^\circ$ ‘lik iki ayrı kontrol penceresine bölünmektedir. Şekil 1b’de eş konumlu işletilen iki haberleşme uydusunun boylam paylaşımı ve zamana bağlı olarak uydunun yörünge hareketleri neticesindeki boylam değişimi görülmektedir [7]. İki kiden fazla uyduyu aynı konumda işletilmek istendiğinde bu metot pratikte kullanımında zorluklar çıkmaktadır.

Dışmerkezlik ve yörünge eğim açısı vektörlerinin kontrol edilmesi metodunda ise uydular boylam penceresinin tümünü kullanırlar ancak dışmerkezlik (e) ve yörünge eğim açısı (i) çemberleri birbirinden ayrılarak kontrol edilir. Böylece, uyduların yerberi argümanı (ω) ve yükselme düğüm açısı (Ω), değerleri birbirinden farklı olur.

Dışmerkezlik ve eğim açısı vektörlerine ayırma stratejisini iki veya daha fazla uyduyu aynı kontrol penceresinde ise uygulanabilir. Yer sabit yörüngedeki bir uydunun dışmerkezlik vektörü $e = (e_x, e_y)$ Eş. 1 ve Eş. 2’de gösterildiği gibi dışmerkezlik skalar değeri ve Ω ve ω ile ifade edilir. Benzer şekilde yere eşlenik yörüngede işletilen bir uydunun eğim açısı vektörü $i = (i_x, i_y)$ Eş. 3 ve Eş. 4 ile ifade edilir.

$$e_x = e \cos(\Omega + \omega) \quad (1)$$

$$e_y = e \sin(\Omega + \omega) \quad (2)$$

$$i_x = i \cos(\Omega) \quad (3)$$

$$i_y = i \sin(\Omega) \quad (4)$$

Burada e : dışmerkezlik, i : eğim açısı, Ω : yükselme düğüm açısı, ω : yerberi argümanını göstermektedir [8].

Uydular aynı konumda güvenli olarak operasyonlarını sürdürmek için belirli kistaslara göre işletilirler. Bunlardan en başta geleni ise uydular arasındaki asgari mesafenin belirlenmesidir. Uyduların işletmecileri uydular arasındaki minimum mesafeyi genelde $3 \times 3 \sigma$ ayrıklığı ile hesaplamaktadır. Eş boylamda işletilen uyduların sayısına göre asgari mesafe değişmektedir. Tablo 1 uyduların sayısı ve uydular arasındaki asgari mesafeyi göstermektedir [9, 10]

Uyduların işletmecileri haberleşme uydularının bozucu kuvvetlerden dolayı (güneş, ay ve dünyanın düzgün olmayan çekim kuvveti, güneş ışını basıncı vb.) yörüngelerinde meydana gelen bozulmaları düzeltmek için uydulara manevra yaptırmadan önce ve manevra

yapıldıktan sonra yörünge belirleme faaliyetinde bulunurlar. Uyduların yörüngesinin belirlenmesi için farklı veri elde etme (ölçüm yapma) yöntemleri kullanılmaktadır. Tek istasyon ile yan ve yükseliş açıları ve mesafe ölçümü [11], istatistiksel çözüm yöntemleri kullanma [12], ikili istasyon mesafe ölçümü [13], mesafe ölçüm sinyalinin istasyonlara erişim zaman farkları kullanılarak yapılan yörünge belirleme, analitik ve ayrık zamanlı hesaplama yöntemleri kullanma [14] uydular üzerinde bulunan küresel konum belirleme alıcıları ile yörünge tespiti [15] en sık kullanılan yöntemlerdir. Tüm ölçüm verileri ve bu verilerin işlenmesinden elde edilen sonuçlarda olduğu gibi belirlenen yörüngenin belirli bir hassasiyeti vardır. Yörünge belirleme hassasiyeti genel olarak, uyduların dinamiğinin matematiksel modeli, elde edilen ölçüm bilgileri hassasiyeti ve çözüm algoritmalarının performansına bağlıdır. Haberleşme uydularının bir sonraki manevraya kadar olan yörünge hareketleri kendisini ispatlamış ticari yazılımlar ile belirli bir hassasiyete göre hesaplanmaktadır. İlk hesaplama zamanına göre süre arttıkça hassasiyet düşmekte ve hata miktarı artmaktadır. Ayrıca tespit edilemeyen ilave bir dış kuvvet (uyduların itki sisteminde sızıntı, küçük meteoritler vb.) olması durumunda bu hata büyük değerlere ulaşmaktadır. Bu hataların ortadan kaldırılması ve anlık olarak uydunun nerede olduğunun bilinmesi ilave bir yörünge güvenliği sağlayacaktır.

Tablo 1. Asgari $3 \times 3 \sigma$ ayrıklık ile eş konumlu işletilen uydular arasındaki asgari mesafe (Minimum distance of collocated satellite with minimum $3 \times 3 \sigma$ separation)

Eş konumlu uyduların sayısı	Asgari $3 \times 3 \sigma$ ayrıklık	Uydular arasındaki mesafe (km)
3	3,8	9,7
4	3,6	8,9
5	3,3	8,1
6	2,9	6,9

Klasik uyduların yörünge belirleme işleminde 14 günlük periyotlarla uydulara düzeltme manevraları yaptırılmakta ve sonrasında yörünge belirleme faaliyetleri yürütülmektedir. Bu yaklaşımda uydulara uygulanan dış kuvvetten (manevra) sonra uydular doğal kuvvetlerin (güneş, dünya ay, güneş radyasyon baskısı vb.) etkisi altında kalmakta 13 gün süre ile başka yapay (harici) kuvvet uygulanmamaktadır. Son zamanlarda yararlı yük kullanımı açısından fayda sağlaması nedeniyle tam elektrikli haberleşme uyduları daha çok üretilmekte ve servise alınmaktadır [16, 17]. Tam elektrikli uydulara ise Tablo 2’de görüldüğü gibi haftada 5 veya 6 defa düzeltme manevrası yaptırılmakta uydular sürekli olarak düşük genlikli manevra kuvvetinin (harici kuvvet) etkisi altında kalmaktadır [18, 19]. Bu yapay kuvvet düşük genlikte de olsa uzun süre uygulandığı için uyduların yörüngesini sürekli değiştirmektedir. Tablo 2’de görüldüğü gibi elektrikli itki sistemine sahip haberleşme uydularının belirlenen stratejiye göre her gün

Tablo 2. Elektrikli itki sistemli ve kimyasal itki sistemli haberleşme uydularının tipik manevra çevrim süreleri ve ilişkili yörünge hesaplamaları (Typical maneuver cycle times and related orbit calculation approaches for electric propulsion and chemical propulsion communication satellites)

Operasyon Tipi	Elektrikli İtki Sistemi Günlük Strateji	Elektrikli İtki Sistemi Haftalık Strateji	Kimyasal İtki Sistemi 14 günlük çevrim
Kuzey/ Güney	Günde 2 defa: 1 Kuzey, 1 Güney 45-120 dakika	Günde 2 defa; 1 Kuzey, 1 Güney, haftada 5 gün 45-180 dakika	2 haftada 1 defa 15-30 dakika
Doğu/ Batı	Kuzey/Güney manevrasından hemen sonra (ihtiyaca göre) 15-30 dk	Haftada 1-2 defa (ihtiyaca göre) 20-40 dk	Kuzey/Güney manevrasından hemen sonra (ihtiyaca göre) 1-5 dk
Yörünge Belirleme	Hergün mesafe ölçümü, haftada 1-2 defa yörünge hesaplama	Operasyon olmayan günlerde	2 haftada 1 defa, mesafe ölçüm ve yörünge hesaplama

veya haftada 5 gün uzun süreli olarak itki sistemi kuvvetine maruz kalmaktadır. Kimyasal itki sistemli uydular ise aynı düzeltme manevraları sırasında çok daha kısa süreli itki sistemi kuvvetine maruz kalmaktadır [20]. Elektrikli itki sistemli uydular 14 günlük çevrimde kuzey/güney ve doğu batı manevralarında toplam yaklaşık 800-2000 dakika itki sistemi kuvvetine maruz kalırken kimyasal itki sistemli uydular aynı çevrimde 30-35 dk itki sistemi kuvvetine maruz kalmaktadır. Bunların dışında uydular doğal kuvvetlerin sürekli olarak etkisi altında kalmaktadır. Bu durum uyduların konumları hassas olarak belirlenirken hata payını artırmaktadır. Haberleşme uyduları arasındaki mesafenin hassas olarak belirlenmesi için harici kuvvetlerin hesaplanma hatası en alt düzeyde veya çok net hatasız tanımlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

Uyduların yörüngeleri belirlenirken ölçüm yapan sistemler, matematiksel modeller ve hesaplama algoritmaları kaynaklı hatalar meydana gelmekte bunlar sistematik ve random olabilmektedir. Dolayısıyla hesaplanan yörünge gerçek yörüngeden farklı olmaktadır [21]. Dünya ve güneşin yerçekimi parametrelerinde değişimler, güneş radyasyonu basıncı, atmosferik sürtünme katsayısı, istasyon yer değerlerindeki hatalar uydu yörüngesinde gerçek durumdan sapmalara neden olmaktadır. [12, 14]. Yörünge belirlemede farklı yöntemler operasyonel kolaylık, ekonomik olması ve daha iyi performans sağlaması gibi nedenlerle tercih edilmektedir. Ancak gerçek uydu yörüngesi ile hesaplanan uydu yörüngesi arasındaki hata epoch zamanından uzaklaştıkça tüm metotlarda artmaktadır [22].

Bu çalışmada önerilen metot uyduların anlık olarak uzaydaki konumunun ölçülmesi ve aralarındaki mesafenin hesaplanmasına yöneliktir. Dolayısıyla zamanın ilerlemesinden ve bilinmeyen dış kuvvetlerden kaynaklı yörünge hataları bu metot ile ortadan kaldırılmış olacaktır.

2. Gerçek Zamanlı Ölçüm Metodu GZÖ (Real time measurement method RTM)

Uydu işletmecileri uydu yörünge belirleme metodu için gerekli ölçüm yöntemleri ile uydularının yörüngelerini belirlemektedir. Genellikle klasik Kepler yörünge parametreleri ile uyduların uzaydaki konumu hesaplanmakta ve operasyonlar bu değerlere göre yürütülmektedir. Bu çalışmada ise eş boylamda (aynı konumda) işletilmekte olan uyduların uzaydaki konum değerleri anlık olarak ölçülmesi önerilmiştir. Bu

önerilen metot ile uyduların uzaydaki konumları anlık olarak izlenebilmekte ve takip edilebilmektedir.

Şekil 3'te bir uydu kontrol istasyonu vasıtasıyla ölçüm yapılmasını göstermektedir. Yer merkezinden yer kontrol istasyonuna vektör yer istasyonu coğrafi konum bilgisi ile hesaplanmaktadır ve sabit bir değerdir. Yer istasyonundan uyduya olan mesafe ve buradaki antenin yan ve yükseliş değerleri uydunun zamana bağlı hareketi ile değişmektedir. Bu iki vektör kullanılarak yer merkezinden uyduya olan 3. vektör hesaplanır. Bu vektör uydunun uzaydaki konumunu belirlemektedir ve yer merkezli yer sabit (YMYS) koordinat sistemi veya enlem boylam yükseklik gibi coğrafi koordinat sistemleri ile ifade edilmektedir.

Yer istasyonunun coğrafi koordinat sistemindeki enlem, boylam ve yükseklik bilgisi WGS84 standardında ifade edilmekte, yer istasyonu YMYS koordinat sisteminde X, Y, Z değerleri Eş. 5, Eş. 6 ve Eş. 7 denklemleri ile hesaplanmaktadır.

$$x = (R_N + h)\cos\phi\cos\lambda \quad (5)$$

$$y = (R_N + h)\cos\phi\sin\lambda \quad (6)$$

$$z = ([1 - e^2]R_N + h)\sin\phi \quad (7)$$

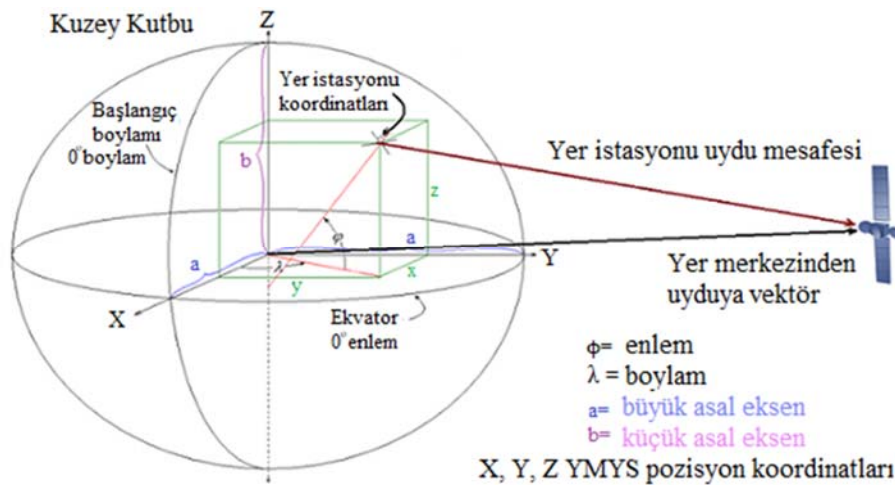
Burada; Φ : geodetic enlem, λ : boylam h: elipsoidal yükseklik, ortalama deniz yüzeyinden yükseklik, e: elipsoit dışmerkezlik değeri, a: dünya modeli yarı-asal eksen (m).

R_N çapraz eğrilik yarıçapı EŞ.8 ile ifade edilmektedir.

$$R_N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (8)$$

Bu verilere ilave olarak yer istasyonundaki ölçüm sonucu elde edilen zamana bağlı yukarıdaki değişkenler çerçevesinde uyduların uzaydaki anlık konumları klasik yan (azimuth), yükseliş (elevation) ve mesafe (ranging) verileri ve gözlem (ölçüm) yapılan yer istasyonu enlem boylam ve yükseklik verileri kullanılarak uydunun yüksekliği Eş. 9, enlemi Eş. 10 ve boylamı Eş. 11 ile elde edilebilir.

$$h_{uydu} = \sqrt{(r_e + h_{yi})^2 + d^2 + 2((r_e + h_{yi})d\sin(\alpha))} \quad (9)$$



Şekil 3. Coğrafi koordinat ve YMYS koordinat sistemi (şekil ölçekli değildir)
(Geographic and ECEF, earth centered earth fixed coordinate system, not to scale)

$$L_{uydu} = \arcsin(\sin(L_{yi}) \cos(\Theta) + \cos(L_{yi}) \sin(\Theta) \cos(\beta)) \quad (10)$$

$$\lambda_{uydu} = \arcsin\left(-\frac{\sin(\Theta) \sin(\beta)}{\cos(L_{yi})}\right) + \lambda_{yi} \quad (11)$$

Burada: h_{uydu} , uydunun yerküreden yüksekliği (m), L_{uydu} : uydu enlem değeri (radyan), ve λ_{uydu} : uydunun boylam değeri (radyan), d : yer istasyonu ve uydu arasındaki mesafeyi (m), α : yan açısını (radyan), β : yükseliş açısını (radyan), λ : boylam Θ : geodetic açı göstermektedir. Burada elde edilen değerler YMYs koordinat sistemine dönüştürülür ve uydunun uzaydaki koordinatlarını X, Y ve Z olarak elde edilir.

Ölçüm yapılan herhangi bir anda yukarıda verilen denklemler kullanılarak uydunun uzaydaki anlık konumu tek ölçüm ile elde edilmektedir. Eş boylamda çalışan uyduların anlık olarak elde edilen açı ve mesafe verileri kullanılarak konumları anlık belirlenebilir ve aralarındaki mesafede anlık olarak tespit edilebilir. Burada elde edilen sonuçlar uydunu gerçek zamanlı olarak takip edilmesine ve izlenmesine imkân vermektedir.

Bu çalışmada eş konumlu uyduların uzaydaki konumunu anlık olarak tespit etmek için aşağıdaki algoritma geliştirilmiş ve MATLAB ile yazılan kodlar ile sonuçlar elde edilmiştir. Hesaplamalarda 16 GB ram, 3.6 GHz 12 çekirdekli işlemci kullanılmıştır. Hesaplama süresi 1 dakikadan daha kısa sürmektedir.

- Yer istasyonun coğrafi koordinatlarda alınan enlem boylam ve yükseklik değerleri YMYs koordinat sistemine X, Y ve Z olarak dönüştürülür.
- Yer istasyonundan eş konumlu uydulara tek tek yan (azimuth), yükseliş (elevation) açıları ve mesafe (range) ölçümü yapılır, Eş. 5, Eş.6 ve Eş.7 gösterilen eşitlikler ile uydunun uzaydaki X, Y, Z ve r konumu elde edilir.
- Şekil 3'te görüldüğü gibi veriler kullanılarak ve hesaplanan değerler elde edilirken YMYs, yer merkezli ataletsel, YMA (ECI) ve coğrafi koordinat sistemleri arasında gerekli dönüşümler yapılır.

Bu yöntem ile 42,0⁰ işletilmekte olan iki haberleşme uydusu Uydu-A ve Uydu-B ile 19,2⁰ işletilmekte olan dört uydu Uydu-1, Uydu-2, Uydu-3 ve Uydu-4 örneklem alınmıştır. Yer istasyonları GS1 (39,6388⁰ kuzey, 32,8015⁰ doğu, yükseklik 1,0977 km) ve GS2 (49,6833⁰ kuzey 6,35⁰ doğu E, yükseklik 0,189 km) vasıtasıyla yapılan anlık konum ölçümleri yapılmıştır. Klasik yörünge belirleme yöntemine uygun olarak gözlem verileri toplanmış ve yörünge dinamiği yazılımı kullanarak Kepler parametreleri (klasik yörünge elemanları) hesaplanmıştır. Klasik yörünge elemanları zamanda yörünge yayılımı yapılmış ve tahmin edilen uydu konumları gösterilmiş ve gerçek zamanlı ölçüm sonuçları ile değerlendirilmiştir.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu çalışmada eş boylamda işletilmekte olan uyduların arasındaki mesafenin doğru olarak takip edilmesi ihtiyacına çözüm olarak gerçek zamanlı ölçüm (GZÖ) ile uydular arası mesafenin anlık olarak ölçülmesi önerilmiştir. Yöntemlerin karşılaştırılmasında ve değerlendirilmesinde 42,0⁰ eş konumda işletilen 2 uydu, Uydu A ve Uydu-B ile 19,2⁰ işletilen 4 uydu, Uydu-1, Uydu-2, Uydu-3 ve Uydu-4 kullanılmıştır. Uyduların uzaydaki konumları, uydu işletmecilerinin kullandığı yörünge dinamiği simülasyon yazılımı (YDS) ile hesaplanmış ve önerilen yöntem ile elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Uydu-A'nın YDS ile yörünge belirleme faaliyetleri tamamlandıktan sonra hesaplanan X, Y, Z konum bilgileri ve GZÖ ile elde edilen konum bilgileri, X, Y, Z ve r olarak km birimi ile Tablo 3'te örnek olarak verilmiştir. Tablonun en sol sütunu t_0 anından itibaren 1'er saat ara ile yapılan ölçümü göstermektedir. Tablonun sağ tarafındaki sütunlarda iki yöntem arasındaki fark gösterilmiştir. Ölçüm periyodu bir haberleşme uydusu yörünge periyodunun 2 katı olan 2 gün (48 saat) olarak seçilmiştir.

Tablo 3'teki Uydu-A konum verileri, 48 saatlik tüm çevrim için Şekil 4a'da YDS yöntemi ile elde edilen sonuçlar ve Şekil 4b'de önerilen GZÖ yöntemi ile elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Grafiklerde sol eksen km olarak Uydu-A'nın X, Y pozisyonu, sağ eksen ise yine km olarak Uydu-A'nın Z pozisyonunu göstermektedir.

Uydu-A'nın YDS ile elde edilen konum değerleri, GZÖ ile elde edilen konum değerleri arasındaki fark her bir ölçüm anı için hesaplanmış ve Şekil 5'te iki yöntem arasındaki fark km olarak verilmiştir. Burada X eksenini saat olarak zamanı, Y eksenini ise km olarak mesafenin sonuçlar arası farkını göstermektedir. Şekil 5'te görüldüğü gibi X ve Y konumlarında en fazla 0,400 km ye kadar Z konumunda ise 0,100 km'ye kadar farklar çıkmıştır. Sonuç bütüncül olarak değerlendirildiğinde, Uydu-A'nın X, Y, Z ve r konumunun YDS ve GZÖ ile elde edilen sonuçların KOKH değerleri sırasıyla 0,285, 0,310, 0,189 ve 0,020 km. dir. Bu değerler ve r eksenindeki 0,020 km gibi oldukça küçük olan fark GZÖ metodunun geçerliliğini göstermektedir. İki yöntem ile elde edilen sonuçların farkları Tablo 1 deki yaklaşma mesafesi 9, 8 km dikkate alındığında oldukça küçüktür.

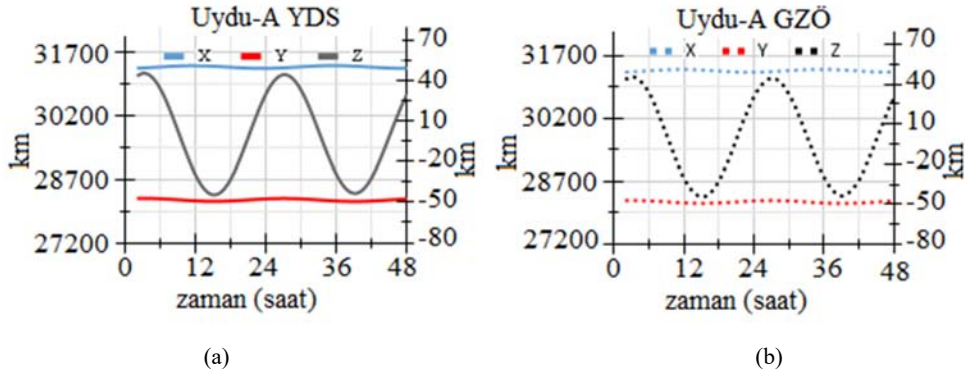
Uydu-A'ya ait Tablo 3'te ayrıntıları verilen tüm verilerden elde edilen sonuçlar diğer 5 uydu içinde aynı tip tablolardan elde edilen veriler ile birlikte değerlendirilerek özet sonuçlar elde edilmiş ve Tablo 4'te gösterilmiştir. Önerilen GZÖ yöntemi ile referans alınan YDS yöntemi arasındaki r konumu hesaplama farkı Tablo 4'te görüldüğü gibi RMSE değeri Uydu- A ve B için 0,020 km, Uydu-1, 2, 3 ve 4 için

Tablo 3. Uydu-A'nın YDS ve GZÖ yöntemleri ile 48 saatlik ölçüm sonucu elde edilen X, Y, Z ve r konum değerleri ve bu değerlerin arasındaki farklar.
(The X, Y, Z, and r position values obtained from a 48-hour measurement of Satellite-A using the ODS and RTM methods, as well as the differences between these values)

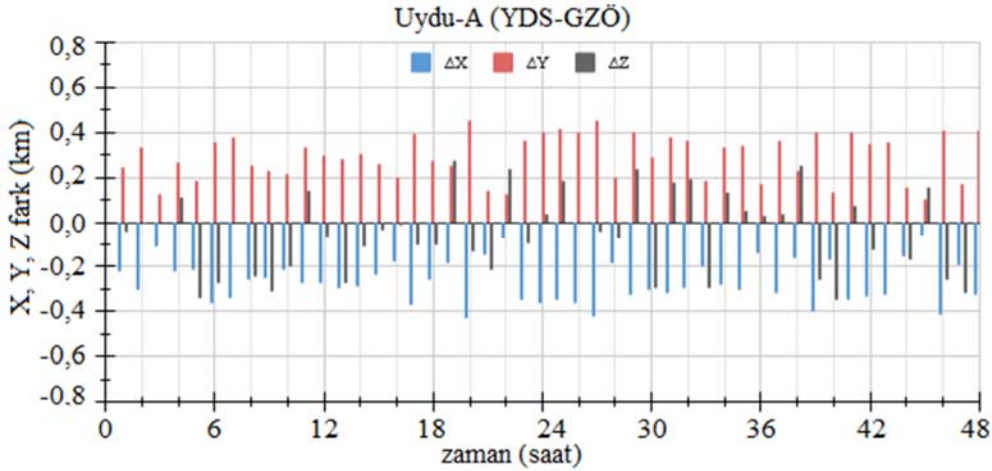
U-A	YDS ile hesaplama (km)				Gerçek Zamanlı Ölçüm(km)				Fark (km)			
	X yds	Y yds	Z yds	r yds	X gzö	Y gzö	Zgzö	r gzö	ΔX	ΔY	ΔZ	Δdr
t_0	31309,528	28245,857	43,077	42167,722	31309,754	28245,610	43,123	42167,725	-0,226	0,247	-0,046	0,231
t_1	31315,714	28247,116	45,218	42173,161	31316,017	28246,782	45,228	42173,163	-0,303	0,334	-0,009	0,303
t_3	31323,299	28245,971	44,261	42178,026	31323,407	28245,843	44,261	42178,021	-0,108	0,128	0,000	0,108
t_4	31331,773	28242,489	40,277	42181,984	31331,999	28242,218	40,167	42181,971	-0,226	0,271	0,110	0,252
...
t_{47}	31308,371	28231,210	29,287	42157,041	31308,564	28231,042	29,610	42157,073	-0,193	0,168	-0,323	0,376
t_{48}	31310,840	28236,679	36,443	42162,543	31311,166	28236,270	36,130	42162,512	-0,326	0,409	0,313	0,452

sırasıyla 0,123 km., 0,127 km., 0,121 km., 0,119 km. olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmanın nihai hedefi olan uydular arası ölçümde görülen farklar oldukça küçüktür ve buda önerilen GZÖ yönteminin oldukça başarılı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Tablo 4 en sağ sütunda 6 uyduya ait r mesafe farkının yüzde olarak hata oranının ortalaması verilmiştir. Kök ortalama kare hata (KOKH)'nin altı uydu için ortalaması yüzde olarak $1,88 \times 10^{-6}$ olarak hesaplanmıştır ve oldukça başarılı bir sonuçtur. Tablo 1'de verilen standartlar referans alındığında 3×3 sigma uydular arası asgari mesafe 3 uydu için 9,7 km ve dört uydu için 8,9 km.'dir. Tablo 4'de görüldüğü gibi en büyük ölçüm farkı 0,162 km ile Uydu-2'ye aittir ve önerilen GZÖ yöntemi oldukça başarılı sonuç üretmektedir.

Buraya kadar gösterilen sonuçlarda önerilen metodun geçerliliği görüldükten sonra asıl amaç olan eş konumda işletilmekte olan uydular arası mesafe ölçümü uygulaması yapılmıştır. İlk olarak eş konumda işletilen Uydu-A ve Uydu-B'nin 48 saatlik konum hesaplamaları, uydu işletmecilerinin yaygın olarak kullandığı YDS yazılımı ile hesaplanmıştır. Uydu-A ve Uydu-B arasındaki mesafe zamana bağlı olarak 11,3 ve 101,34 km arasında değişmektedir. Uydu-A ve Uydu-B arasındaki fiziksel mesafe (3D mesafe) Şekil 6a'da sol eksen km olarak YMYS koordinat sisteminde gösterilmiştir. Benzer şekilde Uydu-A ve Uydu-B arasındaki fiziksel mesafe GZÖ yöntemi ile elde edilen mesafe değerleri zamana bağlı olarak, Şekil 6b'de verilmiştir.



Şekil 4. (a) Uydu-A'nın YDS ile hesaplanan X, Y, Z konum değerleri, b) Uydu-A'nın GZÖ ile elde edilen X,Y, Z konum değerleri. (a) The X, Y, Z position values of Uydu-A calculated using the ODS method, (b) The X, Y, Z position values of Uydu-A obtained using the RTM method)



Şekil-5. Uydu-A'nın kartezyen koordinat sisteminde uzaydaki konumunun YDS ve GZÖ ile elde edilen sonuçlar arasındaki fark. Sol eksen km olarak fark, alt eksen saat olarak zaman bilgisi (The difference between the results obtained using the ODS and RTM methods for the position of Uydu-A in Cartesian coordinate system in space. The left axis represents the difference in kilometers, and the bottom axis represents the time information in hours)

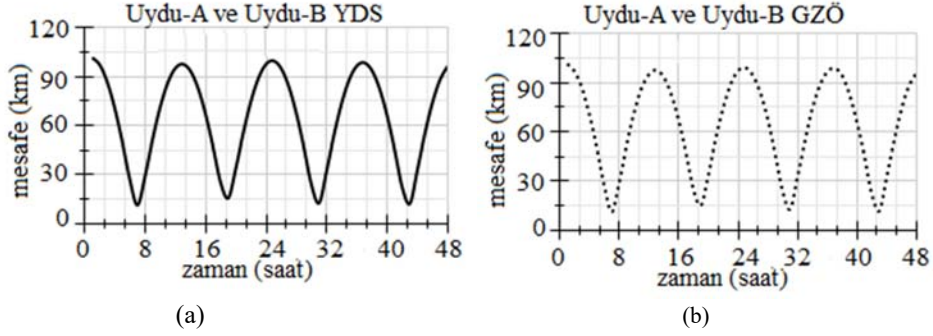
Tablo 4. Haberleşme uyduları için yörünge dinamiği hesaplama (YDS) ve anlık gerçek zamanlı ölçüm (GZÖ) ile elde edile konum (r) sonuçları farkı.

(The difference between the position (r) results obtained for communication satellites by using the orbital dynamics simulator (ODS) method and by instantaneous real-time measurement using the real-time measurement (RTM) method.)

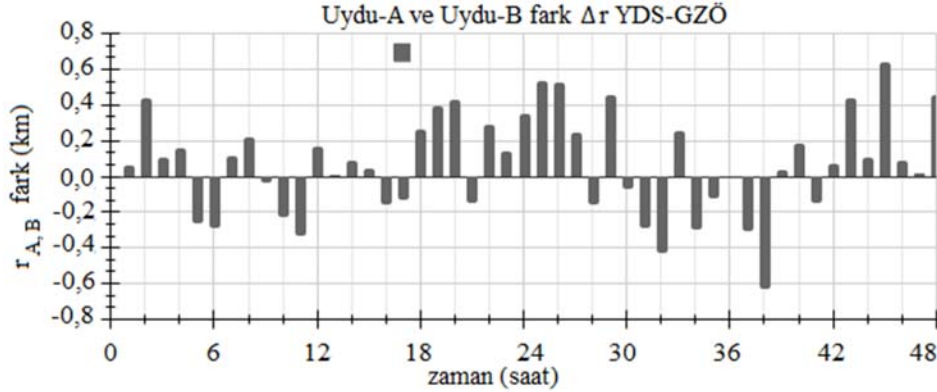
	Uydu-A	Uydu-B	Uydu-1	Uydu-2	Uydu-3	Uydu-4	Ort. %
Ortalama (km)	-0,004	-0,001	0,120	0,125	0,119	0,117	$1,88 \times 10^{-6}$
En büyük (km)	0,032	0,035	0,161	0,162	0,160	0,159	$1,50 \times 10^{-6}$
En küçük (km)	-0,034	-0,034	0,081	0,077	0,078	0,076	$1,95 \times 10^{-6}$
Standart Sapma (km)	0,020	0,020	0,027	0,024	0,023	0,025	$3,30 \times 10^{-5}$
KOKH (km)	0,020	0,020	0,123	0,127	0,121	0,119	$1,88 \times 10^{-6}$

Referans alınan YDS yöntemi ile GZÖ yöntemi arasındaki hesaplanan fiziksel mesafe farkı GZÖ yönteminin başarısını gösterecektir. Şekil 7'de 48 saatlik ölçüm sırasında saat başlarında yapılan YDS hesaplama ve GZÖ ölçüm farkları görülmektedir. Burada X eksenini saat olarak zamanı, Y eksenini ise km olarak mesafenin yöntemler arası sonuç farkını göstermektedir. Şekil 5 ve Tablo 5'in 1. sütunu birlikte değerlendirildiğinde, Uydu-A ve Uydu-B için iki yöntem arasındaki ortalama mesafe farkı 0,068 km ve KOKH 0,290 km olarak görülmektedir. Önerilen GZÖ yöntemi eş konumda işletilen iki uydu

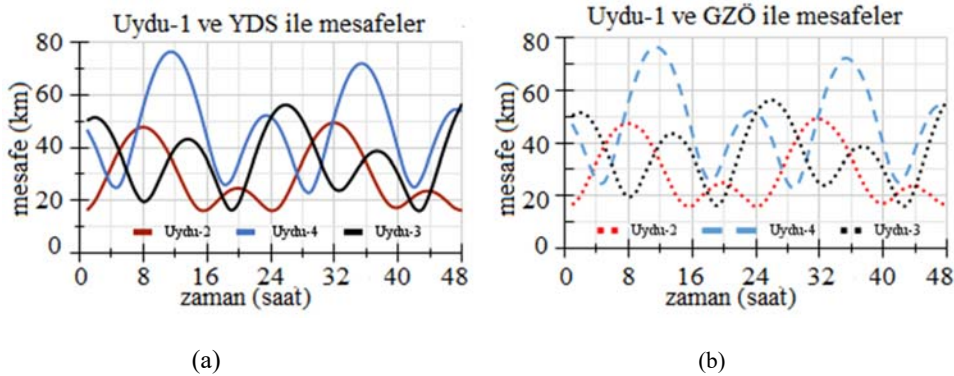
için oldukça başarılı sonuç üretmektedir. Benzer şekilde YDS yöntemi ve GZÖ yöntemi eş konumda işletilen dört uyduya daha uygulanmıştır. Şekil 8a'da eş konumda işletilen Uydu-1 ile Uydu-2, Uydu-3 ve Uydu-4 arasındaki YDS ile hesaplanan mesafeler gösterilmiştir. Şekil 8b'de ise aynı uydular arasındaki mesafeler önerilen GZÖ ile elde edilmiş ve gösterilmiştir. Uydular beklendiği gibi harmonik hareket yapmakta ve gün içerisinde birbirlerine olan mesafeleri artmakta 50-70 km ye kadar ulaşmakta, yaklaşma olduğu zamanda ise 15-20 km ye kadar azalmaktadır.



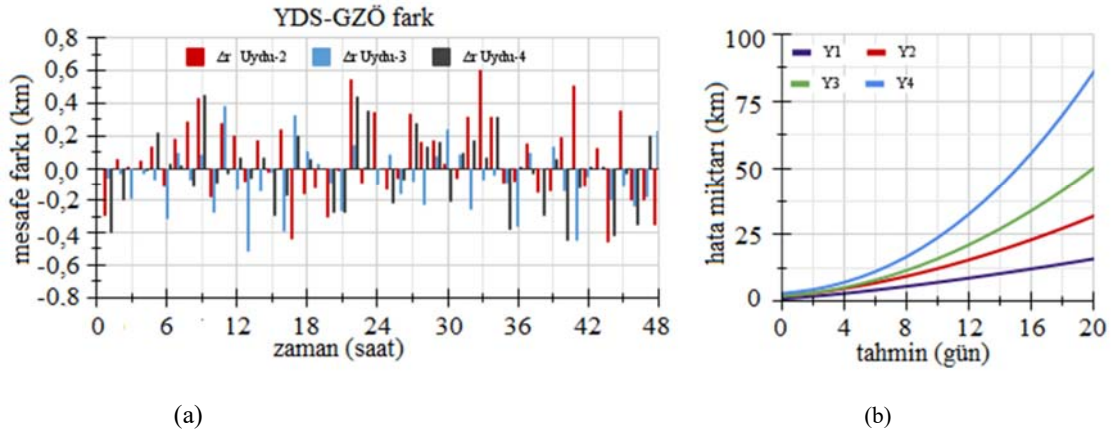
Şekil 6. (a) Uydu-A ve Uydu-B'nin 48 saatlik sürede YDS ile hesaplanan aralarındaki mesafenin zamana bağlı değişimi, (b) uydular arası mesafenin gerçek zamanlı ölçüme GZÖ metoduna göre değişimi
 ((a) Time-dependent variation of the distance calculated using the ODS method between Uydu-A and Uydu-B over a period of 48 hours, (b) Real-time measurement of the variation in inter-satellite distance using the RTM method)



Şekil 7. Uydu-A ve Uydu-B'nin 48 saatlik sürede YDS ve GZÖ ile elde edilen uydular arası mesafe arasındaki fark
 (The difference between the ODS and RTM calculated results for the distance between Sat-A and Sat-B over a period of 48 hours)



Şekil 8. (a) Uydu-1 ile Uydu-2, Uydu-3 ve Uydu-4'ün aralarındaki mesafenin 48 saatlik sürede YDS ile hesaplanan zamana bağlı değişimi, (b) Uydu-1 ile diğer uydular arasındaki mesafenin GZÖ ile ölçülen zamana bağlı değişimi
 ((a) The time-dependent variation of the distance between Uydu-1 and Uydu-2, Uydu-3, and Uydu-4 calculated by ODS for a 48-hour period, (b) The time-dependent variation of the distance between Sat-1 and other satellites measured by RTM)



Şekil 9. a) Uydu-1 ile Uydu-2, Uydu-3 ve Uydu-4'ün 48 saatlik sürede YDS ve GZÖ ile elde edilen uydular arası mesafe arasındaki fark b) Klasik yörünge parametrelerinin YDS türevi metotlarla zamana bağlı yayılması ile meydana gelen hataların tanıtımlık örneklemi (literatür taramasından)

(The difference between the distances calculated using ODS and RTM for 48 hours among Uydu-1 and Uydu-2, Uydu-3 and Uydu-4, (b) A representative example of errors caused by the propagation of classical orbit parameters with ODS-derived methods with respect to time, as found in a literature survey)

Tablo 5. Tüm uydular için YDS ve GZÖ yöntemi ile elde edilen uydular arası mesafe farkı (Δr) sonuçları
(The differences of distance (Δr) between ODS and RTM methods for all satellites)

	Uydu-A-B	Uydu-1-2	Uydu-1-3	Uydu-1-4	Ort. %
Ortalama (km)	0,068	0,047	-0,071	-0,023	$5,79 \times 10^{-5}$
En büyük (km)	0,642	0,609	0,387	0,452	$2,91 \times 10^{-3}$
En küçük (km)	-0,627	-0,459	-0,516	-0,448	$1,01 \times 10^{-2}$
Standart Sapma (km)	0,282	0,253	0,188	0,218	$1,87 \times 10^{-3}$
KOKH (km)	0,290	0,257	0,201	0,219	$2,66 \times 10^{-4}$

Uydu-1 ile Uydu-2, Uydu-3 ve Uydu-4 arasındaki mesafenin her iki yöntem ile elde edilen konum değerlerinin farkının 48 saatlik ölçüm sonucu elde edilen ayrıntılı grafiği Şekil 9a'da gösterilmiştir. Grafiklerde de görüldüğü gibi farklar $\pm 0,5$ km bandında değişmektedir. Bu fark asgari işleme mesafesinin 8,9 km olduğu dikkate alındığında oldukça küçüktür ve GZÖ'nün başarısı burada da görülmektedir.

Eş konumda işletilen 4 uydu için elde edilen Şekil 9a ve Tablo 5 ile birlikte değerlendirildiğinde her iki yöntem arasındaki en büyük fark 0,609 km ile Uydu-1 ve Uydu-2 arasındadır. Tüm uydular için özet değerlendirme yapıldığında Uydu-1 ve Uydu-2,3,4 iki farklı yöntemin sonuçları arasındaki KOKH değerleri sırasıyla 0,257 km, 0,201 km ve 0,219 km'dir. Bu iki yöntem arasındaki mesafenin tüm uyduların ortalamasının hata yüzdesi KOKH değeri $2,66 \times 10^{-4}$ seviyesindedir. Görüldüğü gibi referans alınan YDS metodu ve önerilen GZÖ metodu birbirine çok yakın sonuçlar üretmektedir. Bu durumda önerilen GZÖ yönteminin geçerliliğini ve başarısını göstermektedir.

YDS yöntemi ile başlangıçta yapılan ölçüm sonuçları ile elde edilen yörünge parametreleri kullanılarak ilerleyen zamanlarda uydunun konumu hesaplanmaktadır. Şekil 9b'de Y1, Y2, Y3 ve Y4 adlı YDS türevi yöntemler ile elde edilen zamana bağlı sonuçlarının gerçek yörünge değerleri ile olan farkı tanıtımlık olarak literatürden elde edilmiştir. Burada görüldüğü gibi zaman (gün) ilerledikçe YDS yönteminde hata miktarı artmaktadır. İlk ölçüm sonuçları yörünge yayılımı yapılarak hesaplanan yörünge ile gerçek yörünge arasındaki fark bir haftalık sürede birkaç km iken ikinci hafta sonunda yöntemle bağlı olarak 1,5-40 km mertebesine kadar çıkmaktadır [23-25].

Yörünge yayılımı (orbit propagation) hatası matematiksel model, çözüm yöntemi gibi parametrelere bağlı olmakla birlikte genel olarak

performansı yüksek metotlarda hata her bir gün için 100 m civarındadır. İki haftalık süre sonunda sadece yayılım kaynaklı hata yayılım çözücü türüne bağlı olarak değişimle birlikte 1,4 km civarında gerçekleşmektedir [26]. Bazı yörünge belirleme yayılım metotlarında ise hata daha yüksek değerlere çıkabilmektedir [27]. Hâlbuki GZÖ yöntemi ile uydu konumları belirlendiğinde hata zamandan bağımsız ve her zaman 0,200 km mertebesindedir. Eş lokasyonda işletilen dört uydu için 3σ uydular arası asgari mesafenin 8,9 km olduğu ve diğer YDS yöntemlerinde ilerleyen zamanlarda birkaç km mertebesinde olan hata miktarları dikkate alındığında önerilen GZÖ yöntemi ile elde edilen ortalama 0,200 km fark çok küçüktür ve GZÖ metodu oldukça başarılı sonuç vermektedir.

4. Sonuçlar (Conclusions)

GZÖ yöntemi uydu işletmecilerinin yaygın olarak kullandığı yazılımlar ile karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür. Eş konumda işletilen haberleşme uyduları arasındaki mesafe, mevcut durumda kullanılan ve zaman ilerledikçe artan iki hafta sonunda hata miktarı birkaç km'ye kadar ulaşan yörünge tahmin yaklaşımları ile elde edilmektedir. Bu çalışma ile uydular arası mesafe gerçek zamanlı ölçüm yöntemi ile elde edilmiş ve ortalama 0,2 km gibi bir hata miktarı ortaya çıkmıştır. Bu yöntemin avantajı zamandan bağımsız olarak her zaman aynı hassasiyette sonuç vermesidir. Ölçümde kullanılan yan, yükseliş ve mesafe ölçüm hassasiyeti daha yüksek sistemler kullanılarak hata oranını düşürmek mümkündür ancak uygulamada bu değerler işletme için yeterli olup sistem iyileştirmesine ve ek maliyete ihtiyaç olmayabilir. Bu yöntem ile ayrıca mevcut yörünge belirleme yazılımları ile elde edilen sonuçlarda görülmesi mümkün olmayan beklenmedik yörünge sapmalarını da içerecek şekilde değerler elde edilmiştir. Bu metodun dezavantajı

uydular arası mesafenin hesaplanması için sürekli ölçüm yapılmasına ihtiyaç duymasıdır. Eş konumlu uydular arası mesafe GZÖ metodu ile belirlenerek uyduların uzaydaki pozisyonları anlık olarak tespit edilebilir ve varsa beklenmedik sapmalara karşı tedbirler alınabilir. Böylece yörünge dinamiği açısından daha emniyetli bir işletme ortamı sağlanmış olacaktır.

Kaynaklar (References)

1. Kisseleff, S., Lagunas, E., Abdu, T. S., Chatzinotas, S., Flexible Resource Optimization for GEO Multibeam Satellite Communication System, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20 (12), 7888-7902, 2021.
2. Astra Colocated Satellites, Four Satellites, <https://www.lyngsat.com/Astra-1KR-1L-1M-1N.html>, Erişim tarihi: Eylül 15, 2022.
3. Türksat Eş konumlu Uydu İşletmeciliği, <https://www.turksat.com.tr/sites/default/files/2022-05/Turksat-2021-Faaliyet-Raporu.pdf>, Yayın tarihi Mart 2022. Erişim tarihi: Eylül 20, 2022.
4. Öz İ., Coverages stabilization of an inclined orbit communication satellite with two axis biases, *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 38.1, 2019-229, 2023.
5. Öz, İ., Yılmaz, Ü. C., Determination of coverage oscillation for inclined communication satellite. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24 (5), 963-973, 2020.
6. Li H., *Geostationary satellites collocation*, Springer, Berlin, Germany, 2014.
7. Hardacre, S., *Control of colocated geostationary satellites*, Doctoral dissertation, Cranfield University, Collage of Aeronautics, 1996.
8. Lee, B., Choi, Kyu-Hong. Collocation of two GEO satellites and one inclined GSO satellite, *Aerospace science and technology*, 4 (7), 507-515, 2000.
9. Wauthier, P., Francken, P., & Laroche, H., Co-location of Six ASTRA Satellites: Assessment After One Year of Operations. In *Space Flight Dynamics*, 403, 13, 1997.
10. Tu, R., Zhang, R., Fan, L., Han, J., Zhang, P., Wang, X. Lu, X., Real-time monitoring of the dynamic variation of satellite orbital maneuvers based on BDS observations. *Measurement*, 168, 108331, 2021.
11. Öz, İ., Evaluation of Station Location for Orbit Determination of Geo Satellites at Different Slots. In *2017 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, 375-379, IEEE., 2017.
12. Curtis, H. *Orbital mechanics for engineering students: Revised Reprint*. Butterworth Heinemann, 2020.
13. Öz, İ., Yılmaz, Ü. C., Güler, Ü., Performance assessment of a turn around ranging in communication satellite orbit determination. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 4 (1), 73-83, 2021.
14. Montenbruck O, Gill E, Lutze F. *Satellite orbits: models, methods, and applications*, *Appl Mech Rev*, 2002.
15. Öz, İ., GEO Satellite orbit determination using spaceborn onboard receiver, *Politeknik Dergisi*: 1-1. 2022.
16. Lu, W., Wang, H., Wu, G., Huang, Y., Orbit determination for all-electric geo satellites based on space-borne GNSS Measurements, *Remote Sensing*, 14 (11), 2627, 2022.
17. Yılmaz C., Oz İ., Design tradeoffs in full electric, hybrid and full chemical propulsion communication satellite, *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 2 (3), 124-133, 2019.
18. Corey, R. L., Pidgeon D. J., *Electric Propulsion at Space Systems/Loral*, Proc. 31st International Electric Propulsion Conference, paper IEPC-2009-270, 2009.
19. Jimenez, F., Sansegundo, M. *Flight Dynamics Operations Solution for Full-Electric Propulsion-Based GEO Missions*. In *SpaceOps 2014 Conference*, 1903, 2014.
20. Li, C., Xu, B., Zhou, W., & Peng, Q., Geostationary station-keeping of electric-propulsion satellite equipped with robotic arms, *Aerospace*, 9 (4), 182, 2022.
21. Öz, İ., Yılmaz Ü.C., Güler Ü., TDOA based tracking measurement for geo satellites orbit determination: evaluation for the satellite operators, *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering*, 23 (1), 137-148, 2022.
22. Lu, W., Wang, H., Wu, G., & Huang, Y., Orbit determination for all-electric GEO satellites based on space-borne GNSS measurements, *Remote Sensing*, 14 (11), 2627, 2022.
23. Peng, H., Bai, X., Improving orbit prediction accuracy through supervised machine learning. *Advances in Space Research*, 61 (10), 2628-2646, 2015
24. Chen, L., Bai, X., Liang, Y., Li, K. B., Chen, L., Orbital Prediction error propagation of space objects. *Orbital Data Applications for Space Objects: Conjunction Assessment and Situation Analysis*, 23-75, 2017.
25. Köker, A., Orbit determination strategy and verification for geosynchronous satellites. Master's thesis, Middle East Technical University, *Aerospace Engineering*, 2019.
26. Li, B., Zhang, Y., Huang, J., & Sang, J., Improved orbit predictions using two-line elements through error pattern mining and transferring. *Acta Astronautica*, 188, 405-415, 2021.
27. Chipade, R.A., Ramanathan, T.V., Extended Kalman filter based statistical orbit determination for geostationary and geosynchronous satellite orbits in BeiDou constellation. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 51 (1), 25-46, 2021