

TÜRKSAT 3A ve TÜRKSAT 4A Uydularının Eşzamanlı Astrometrik Gözlem Sonuçları

Seda Aydın¹  , H. Gökhan Gökay² , M. Naim Bağırhan³ , Sacit Özdemir² 

¹ TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü

² Ankara Üniversitesi Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü

³ Türksat Uydu Haberleşme Kablo TV ve İşletme A.Ş

Accepted: January 10, 2023. Revised: December 27, 2022. Received: November 11, 2022.

Özet

Jeosenkron yörüngede dolanan Türkiye'nin haberleşme uyduları TÜRKSAT 3A ve 4A'nın astrometrik gözlemlerinden elde edilen yörünge çözümleri bu çalışmada sunulmaktadır. Astrometrik gözlemler, TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi Bakırlitepe yerleşkesindeki T100 ve TÜRKSAT A.Ş. Gölbaşı yerleşkesindeki T50 teleskopları kullanılarak aynı gözlem gününde gerçekleştirilmiştir. Gözlem verileriyle TLE (Two-Line Elements) verileri karşılaştırıldığında, Sağ Açıklık ve Dik Açıklık olarak ortalama 0.01° farkla açısal ölçümler elde edilmiştir. Yörünge çözümleri olarak, iki veya üç gözlem verisinden Başlangıç Yörünge Tespiti (IOD-Initial Orbit Determination) yöntemleri kullanılmıştır. Uyduların hesaplanan başlangıç yörüngesi, gözlem gecesi boyunca elde edilen tüm verilere En Küçük Kareler Yöntemi (LSQ-Least Square Method) uygulanarak iyileştirilmiş ve yayınlanan yörünge parametreleri ile karşılaştırılmıştır. Gözlem ölçümlerinin hassas hesaplandığı durumlarda LSQ metodunun yörüngeyi iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Abstract

Orbital solutions obtained from astrometric observations of TÜRKSAT 3A and 4A, Turkey's communication satellites in Geosynchronous Orbit, are presented in this paper. Astrometric observations have been simultaneously (same day of observation) carried out using the T100 telescope at TÜBİTAK National Observatory, Bakırlitepe, Antalya and the T50 telescope at TÜRKSAT Inc., Gölbaşı, Ankara. Initial Orbit Determination (IOD) methods from two or three observation data have been used for solving orbital parameters. Comparing of observation and TLE (Two-Line Elements) data, angular measurements have been obtained as Right Ascension and Declination with an average difference of 0.01°. The determined initial orbit of the satellites has been improved by applying the Least Square Method (LSQ) to all the data obtained during the observation night and compared with the published orbital parameters in literature. It has been determined that the LSQ method improves the satellites'orbital parameters in cases where the observation measurements have high accuracy.

Anahtar Kelimeler: Orbital Dynamics – Geosynchronous Satellites – Astrometry

1 Giriş

Uzay çağının başlamasıyla birlikte Yer yörüngesinde dolanan yapay cisimlerin (uydular, fırlatma araçları, uzay çöpleri vb.) yer tabanlı gözlemleri de önem kazanmıştır. Bu gözlemler radyo antenler ile yapılabildiği gibi optik teleskoplarla da yapılabilmektedir. Optik teleskoplarla gerçekleştirilen gözlemler ağırlıklı olarak astrometrik ve fotometrik yöntemlere dayalı olmakla beraber (Park ve diğ. 2018; Campbell ve diğ. 2018; Cardona ve diğ. 2016; Montojo ve diğ. 2011) nadiren tayfsal yöntemler de (Rossi ve diğ. 2012; Vananti ve diğ. 2017) kullanılmaktadır. Ayrıca, Jeosenkron (GEO) yörüngelerdeki yapay cisimler için RADAR (RADio Detection And Ranging) sistemlerinin çözümleri mesafe sebebiyle etkin olmaması, yüksek irtifadaki yörüngelerde optik gözlemlerin kullanımını arttırmaktadır.

Dünya'nın kütle dağılımı, diğer gezegenlerin kütle çekimleri, atmosferin sürtünme kuvveti, Güneş'in ışınım basıncı vb. kuvvetler sebebiyle yapay cisimlerin yörüngeleri zamanla değişmektedir. Bu değişimler için periyodik olarak

ve diğer gök cisimleriyle çarpışma olasılığının yüksek olduğu durumlarda anlık olarak yörünge düzeltme operasyonları yapılmaktadır. Cisim üzerindeki etkilerin değişimini daha duyarlı belirleyebilmek veya iyileştirebilmek için gözlemlerinin yapılması gerekmektedir (örn. Choi ve diğ. 2015). Farklı lokasyonlarda yapılan gözlemlerle yapay cisimlerin yörüngeleri daha hassas saptanabilmektedir. Bu ihtiyacı karşılamak için Dünya çapında çeşitli gözlem ağları mevcuttur (örn. OWL sistemi: Park ve diğ. 2018; APOSOS Projesi: Guo ve diğ. 2020).

Rossi ve diğ. (2012) tarafından da belirtildiği gibi, yapay cisimlerin özellikle uzay çöplerinin yeterli fotometrik, tayfsal veya fiziksel verisi bulunmadığından, yapay cisimlerin fiziksel yapısını anlamlandırmada yetersiz kalınmaktadır. Yer yörüngesinde dolanmakta olan her türlü cismin duyarlı yörünge çözümlerleri için, farklı tür (optik, LIDAR, RADAR vb.) gözlemlerle takipleri konusunda, nicelik ve niteliği giderek artan çalışmalara yer verilmektedir. Bu gözlemler ile sadece yapay cisimlerin yörüngesi takip edilmemekte, yörüngesindeki durumu ve cismin niteliğinin yer tabanlı gözlemlerle elde edilebilmesi için çalışmalar yapılmaktadır (Piergentili ve diğ. 2017; Yanagisawa & Kurosaki 2012; Bai ve diğ. 2009; Calef ve diğ. 2006). Dolayısıyla yer tabanlı ışık değişiminden cismin fiziksel yapısının ortaya çıkarılması konusunda araştırmalar da

* 8sedaydin8@gmail.com

Çizelge 1. T50 ve T100 teleskopları ile alınmış ve bu çalışmada kullanılmış olan verilere ait bilgiler. Kolon adlandırmaları: N_a : Alınan görüntü sayısı, G_{med} : Medyan Atmosferik Görüş ("), H_{med} : Medyan Atmosferik Hata ("), N_k : Kullanılan görüntü sayısı.

Tarih	N_a		G_{med}		H_{med}		N_k	
	T50	T100	T50	T100	T50	T100	T50	T100
26 Ekim 2021	6090	373	3.99	2.79	0.369	0.206	4681	152
28 Ekim 2021	5500	2035	3.62	2.28	0.360	0.162	3737	1511
24 Aralık 2021	6833	794	3.56	2.18	0.168	0.098	5249	67

söz konusudur. Bu yöntemler esasen, analitik çözümlene gücü asteroid ışık eğrilerinin analizinde dışbükey örtü yapıyı esas alarak ispatlanmış olan modellere (Kaasalainen & Torppa 2001; Kaasalainen ve diğ. 2001) dayanmaktadır.

Bu çalışmada GEO yörüngedeki Türkiye'nin haberleşme uyduları TÜRKSAT 3A ve 4A'nın aynı gözlem gününde gerçekleştirilen yer tabanlı astrometrik gözlem sonuçları sunulmaktadır. Astrometrik gözlemlerden çözümlenen göksel konumlara dayalı olarak, yörünge parametreleri belirlenmiş, kataloglarda sunulan değerlerle uyumluluğu izlenmiştir.

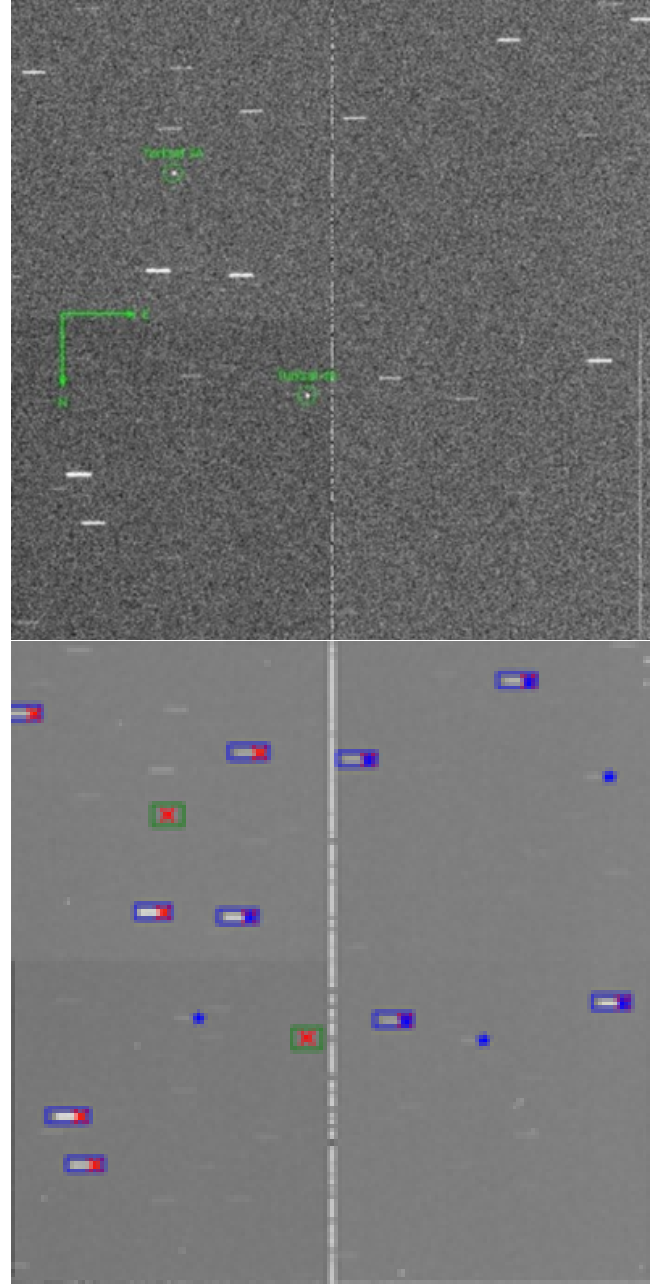
2 Yöntem

2.1 Astrometrik Gözlem ve İndirgeme Yöntemleri

Aynı gözlem günlerinde (bkz. Çizelge 1), TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi, Bakırlitepe (Antalya) ve TÜRKSAT, Gölbaşı (Ankara) Yerleşkelerinde TÜRKSAT 3A ve 4A uydularının astrometrik gözlemleri gerçekleştirilmiştir. TÜRKSAT Yerleşkesinde konuşlu, 50 cm çaplı açıklığa sahip T50 teleskop, f/8 odak oranına sahiptir ve odak düzleminde 2kx2k çözünürlüklü FLI ProLine 4240 CCD kamera bulunmaktadır. TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi Yerleşkesindeki gözlemler ise 100 cm açıklığa sahip T100 teleskobu ile gerçekleştirilmiştir. Bu teleskop f/10 odak oranına sahip olup, odak düzleminde 4kx4k çözünürlüklü SI 1100 CCD kamera bulunmaktadır. Gözlemler çoğunlukla filtresiz yapılmıştır ancak zaman zaman T100 teleskobunda SDSS g'r'i'z' filtreleri de kullanılmıştır.

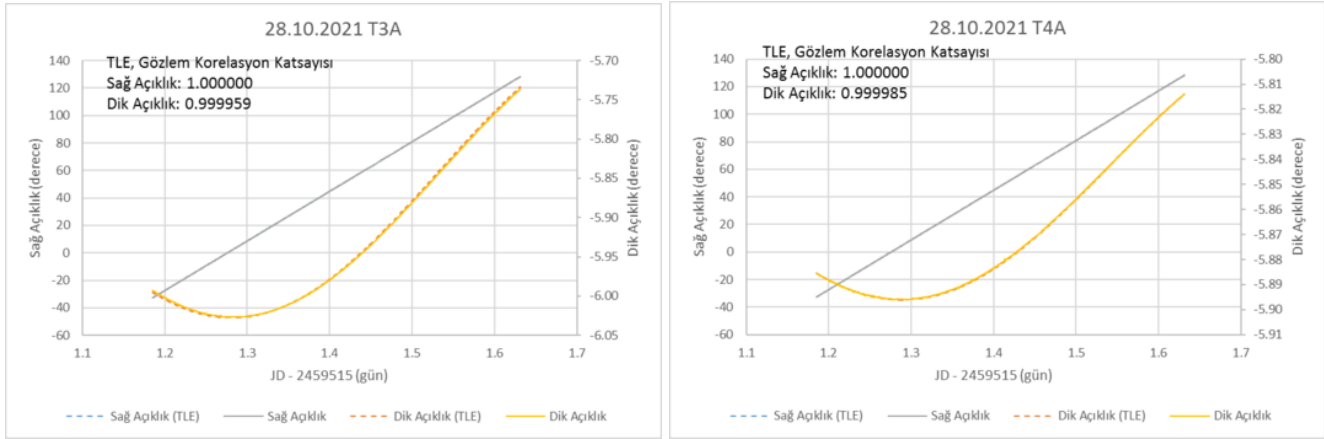
Gözlemler, hava koşullarının uygun olduğu nispette aynı gün yapılmıştır. Ancak, eşzamanlılık için kullanılan CCD detektörlerin okuma zamanları, çözünürlükleri, alınan görüntüleri kaydeden yazılımların bulunduğu bilgisayar sistemlerinin yazılımsal ve donanımsal farklılıkları bulunmaktadır. Bu nedenle kaydedilen görüntülerden elde edilen astrometrik çözümler, zaman ekseninde enterpolasyon edilerek eşzamanlılık sağlanmıştır. Ölçülen açısız uydular için, bir gözleminde t anında yapılan gözlemler doğrudan kullanılmış, diğer gözleminde t anına en yakın bir önceki ve bir sonraki yapılmış gözlem, t anına enterpole edilmiştir. Hedefler, Yer ile senkron hareket eden GEO yörüngedeki cisimler olduğundan, görüntülerdeki Sinyal/Gürültü oranını artırabilmek adına, gözlemler yıldız takibi kapalı modda gerçekleştirilmiş ve poz süresi olarak 5s seçilmiştir.

Gözlemlerin astrometrik çözümleri (WCS – World Coordinate System), CCD görüntüleri için ön indirgeme işlemi sonrasında, her görüntü üzerinde bulunan yıldız izlerinin başlangıçlarının piksel koordinatları ile katalog koordinatlarının eşleştirmesi standart IRAF paketleri kullanılarak yapılmıştır.

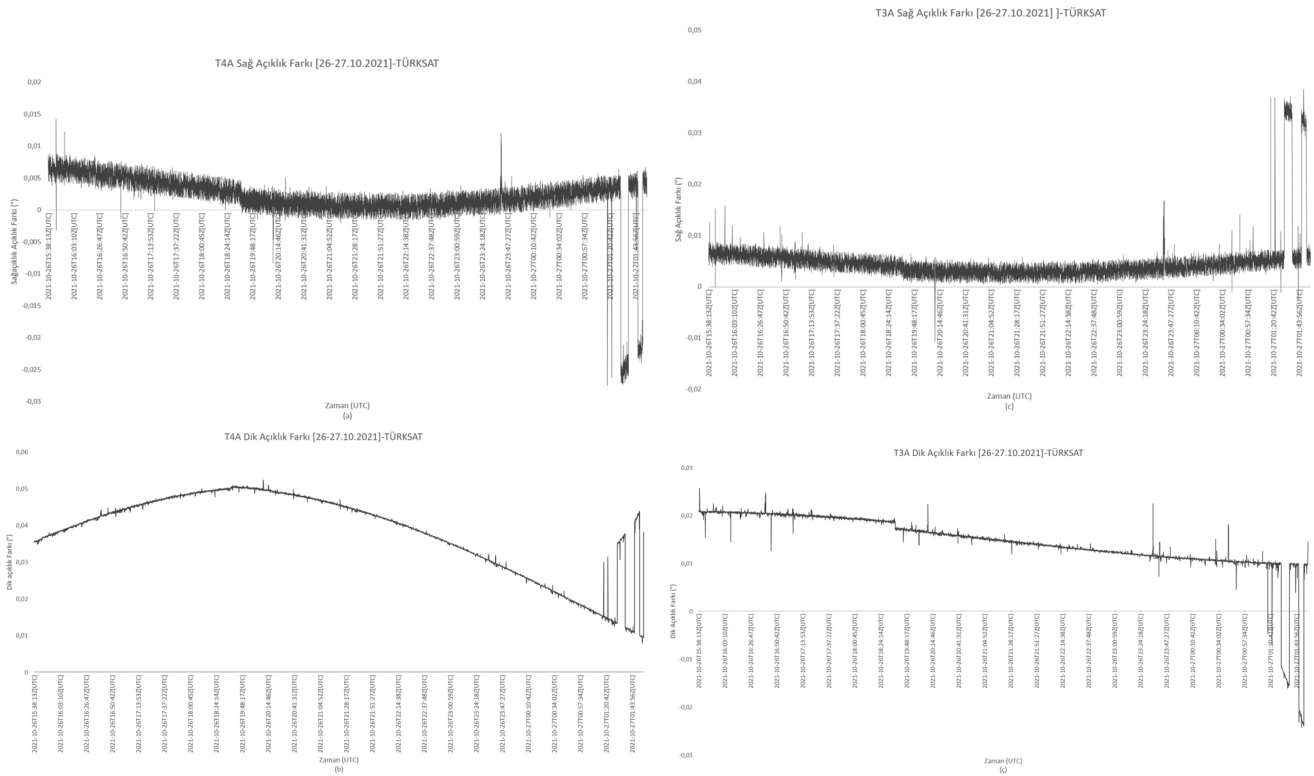


Şekil 1. GEO yörüngedeki TÜRKSAT 3A ve 4A uyduları, teleskop yıldız-takibi kapalı modda gözlenmiştir (üst panel). Alt panelde dikdörtgen sınırlarla çevrili kaynaklar astrometrik çözüm için seçilen yıldızları, kare sınır ile çevrili kaynaklar gözlenen uyduları; "x" sembolleri uydular için merkezi, yıldız izleri için izin başlangıç noktalarını; yıldız sembolleri ise astrometrik çözüm sonrasında görüntü üzerindeki yıldızların katalog (GAIA DR2.0) koordinatlarını göstermektedir.

Gözlemler takip kapalı modda yapıldığından, görüntüler üzerinde yıldızlar iz şeklinde, uydular ise nokta kaynak olarak görülmüştür. Yıldız izlerini, Gauss ve Line fonksiyonlarının konvolüsyonundan elde edilen fonksiyon kullanılarak (örn. Vereş ve diğ. 2012), uydular ise Gauss fonksiyonu kullanılarak modellenmiştir. Örnek görüntüler Şekil 1'de verilmiştir. Yapılan gözlem sayıları, gözlem gecesi boyunca astrometrik



Şekil 2. Astrometrik ölçümlerden gözlemsel yolla belirlenen uydu koordinatları (sürekli çizgiler) ile TLE'den hesaplanan koordinatların (kesikli çizgiler) karşılaştırması. Korelasyon katsayılarına bakıldığında uyumun %100 mertebesinde olduğu görülmektedir.



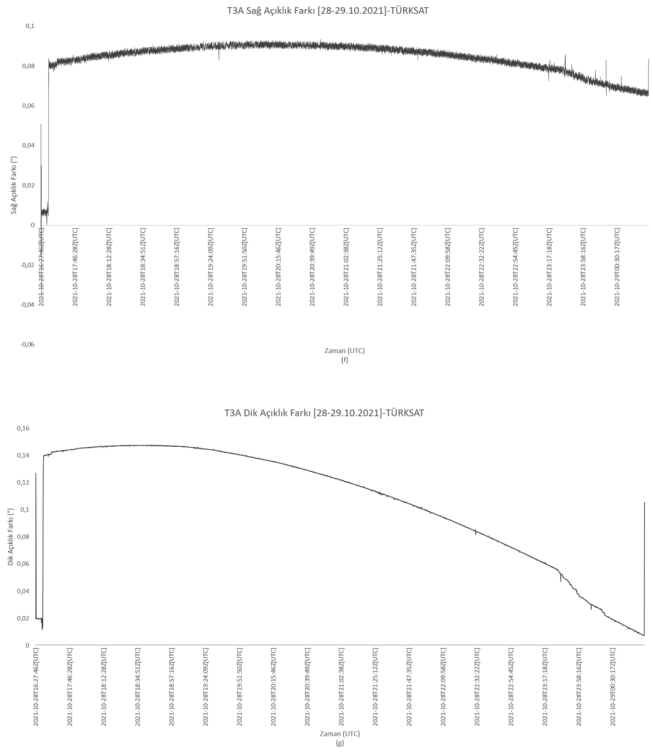
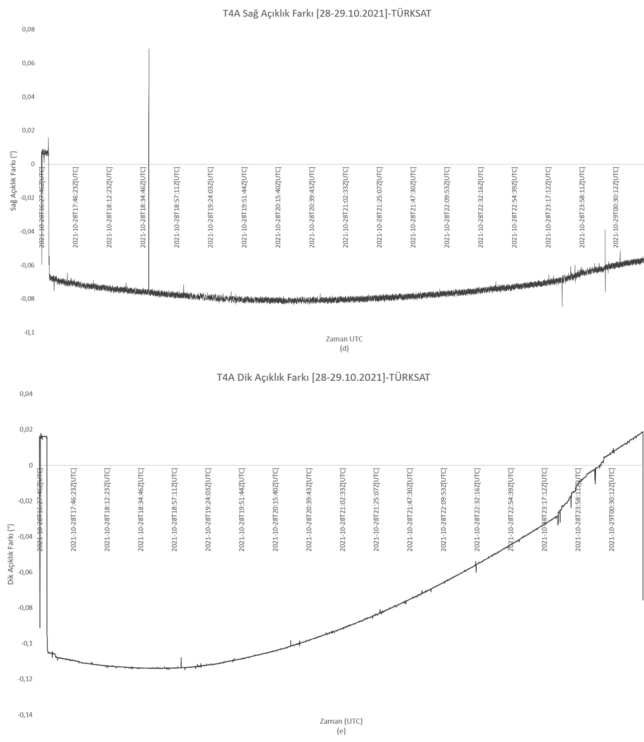
Şekil 3. TÜRKSAT gözlemeviden 26-27/10/2021 tarihinde elde edilen açısal ölçümlerin TLE ile karşılaştırması.

dönüşümlerdeki medyan hataları ve atmosferik görüş değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. Astrometrik çözümleme için seçilen arka plan yıldızlarına ait konumlar GAIA DR2.0 kataloğundan alınmıştır (Gaia Collaboration ve diğ. 2018). Astrometrik çözümü elde edilen uydu koordinatları ile NORAD tarafından yayınlanan TLE parametrelerine dayalı olarak hesaplanan uydu koordinatları karşılaştırılmıştır (bkz. Şekil 2). Sağ ve Dik Açıklıklar arasındaki uyumun çok iyi ($R=1.0$) olması, yapılan astrometrik dönüşümün başarılı olduğunu göstermektedir.

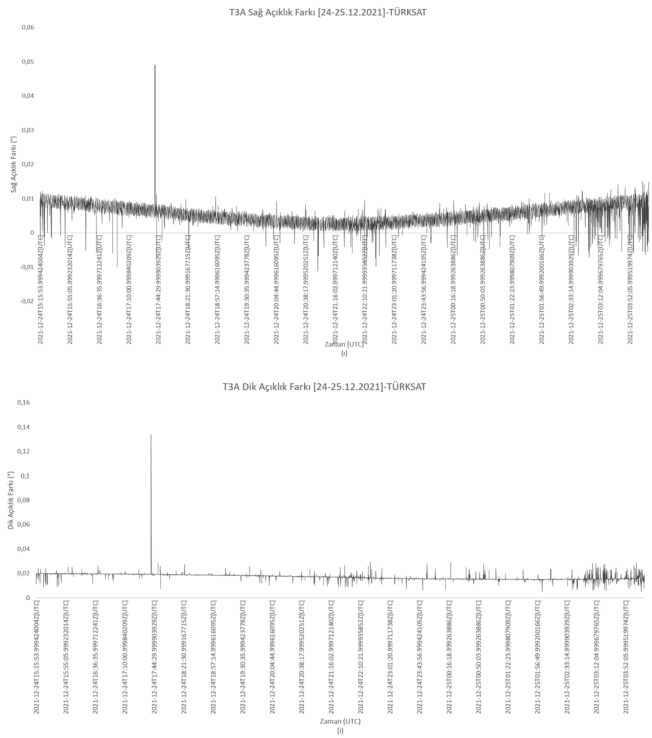
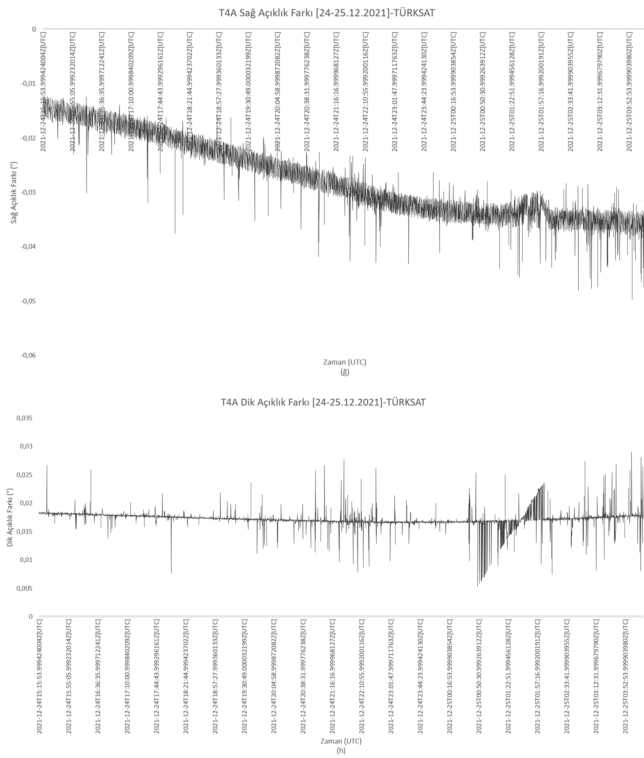
TÜRKSAT gözlemeviden elde edilen Şekil 3'te 26-27/10/2021 tarihindeki gözlemler için TLE ile T4A Sağ Açıklık farkı (a)'da, T4A Dik Açıklık farkı (b)'de, T3A Sağ Açıklık

farkı (c)'de, T3A Dik Açıklık farkı (ç)'de gösterilmiştir. Şekil 4'te 28-29/10/2021 tarihindeki TÜRKSAT gözlemeviden elde edilen gözlemler için TLE ile T4A Sağ Açıklık farkı (d)'de, T4A Dik Açıklık farkı (e)'de, T3A Sağ Açıklık farkı (f)'de, T3A Dik Açıklık farkı (g)'de gösterilirken, 24-25/12/2021 tarihindeki gözlemler için Şekil 5'te, TLE ile T4A Sağ Açıklık farkı (ğ)'de, T4A Dik Açıklık farkı (h)'de, T3A Sağ Açıklık farkı (ı)'da, T3A Dik Açıklık farkı ise (i)'de gösterilmiştir.

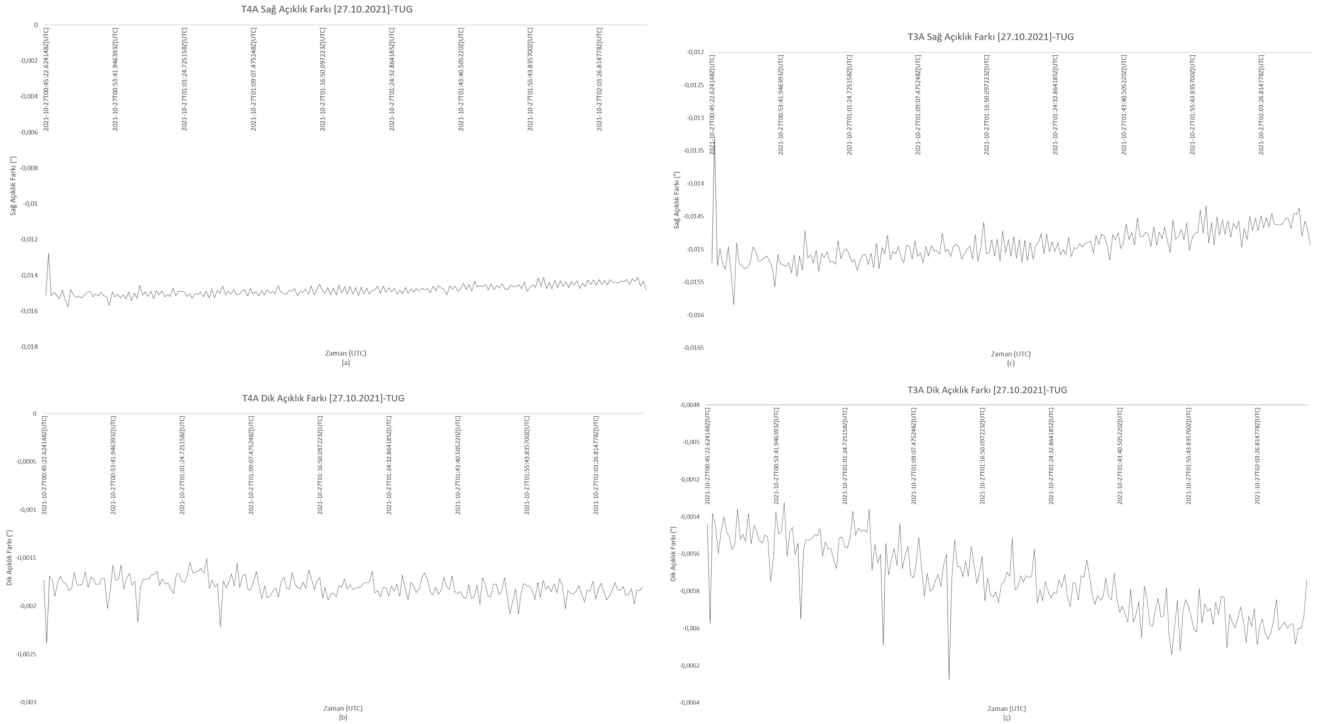
TUG gözlemeviden elde edilen Şekil 6'da, 26-27/10/2021 tarihindeki gözlemler için TLE ile T4A Sağ Açıklık farkı (a)'da, T4A Dik Açıklık farkı (b)'de, T3A Sağ Açıklık farkı (c)'de, T3A Dik Açıklık farkı (ç)'de gösterilmiştir. Şekil 7'de 28-29/10/2021



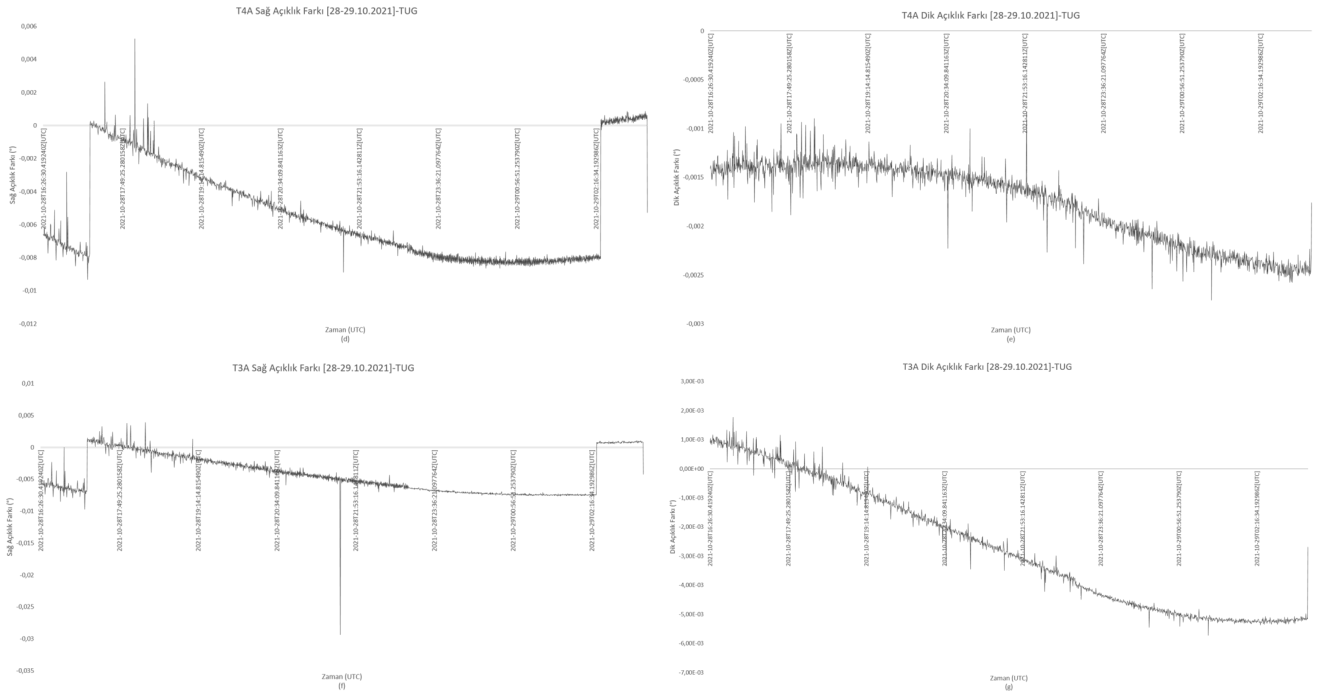
Şekil 4. TÜRKSAT gözleminden 28-29/10/2021 tarihinde elde edilen açılal ölçümlerin TLE ile karşılaştırması.



Şekil 5. TÜRKSAT gözleminden 24-25/12/2021 tarihinde elde edilen açılal ölçümlerin TLE ile karşılaştırması.



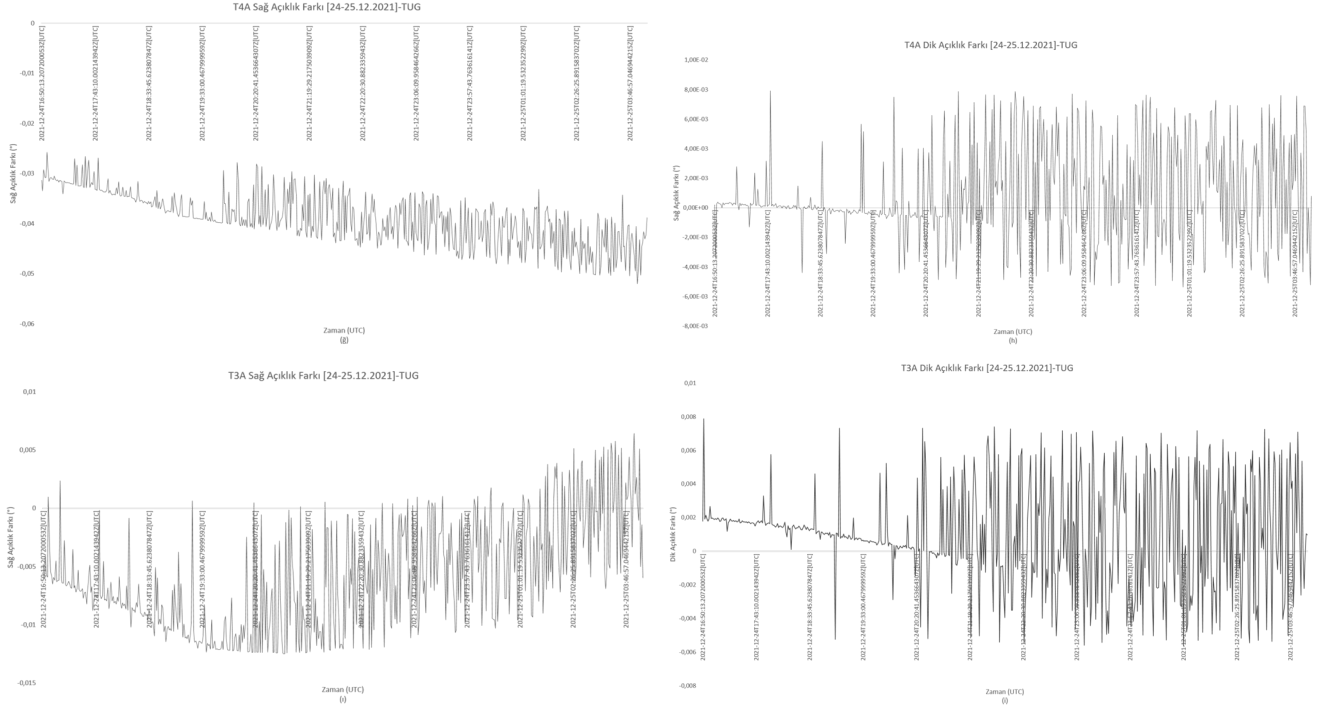
Şekil 6. TUG gözleminden 26-27/10/2021 elde edilen açısal ölçümlerin TLE ile karşılaştırması.



Şekil 7. TUG gözleminden 28-29/10/2021 tarihinde elde edilen açısal ölçümlerin TLE ile karşılaştırması.

tarihindeki TUG gözleminden elde edilen gözlemler için TLE ile T4A Sağ Açıklık farkı (d)'de, T4A Dik Açıklık farkı (e)'de, T3A Sağ Açıklık farkı (f)'de, T3A Dik Açıklık farkı (g)'de gösterilirken, 24-25/12/2021 tarihindeki gözlemler için Şekil 8'te TLE ile T4A Sağ Açıklık farkı (ğ)'de, T4A Dik Açıklık

farkı (h)'de, T3A Sağ Açıklık farkı (ı)'da, T3A Dik Açıklık farkı (i)'de gösterilmiştir.



Şekil 8. TUG gözleminden 24-25/12/2021 tarihinde elde edilen açılak ölçümlerin TLE ile karşılaştırması.

2.2 Yörünge Analizi

Yörünge analizinde, ilk olarak uydunun iki veya üç farklı zamanda yapılmış konum açıları kullanılarak uydunun başlangıç yörüngesi tespit edilmiştir. Tespit edilen başlangıç yörüngesiyle birlikte, En Küçük Kareler Yöntemi (Miller, Steven J. 2021)'nin tüm gözlemlere uygulanmasıyla hassas yörünge belirlenmesi yapılmıştır.

2.2.1 Başlangıç Yörünge Tespiti

Gauss, Double-R, Laplace, Gooding, Gibss, Lambert yöntemleri Başlangıç Yörünge Tespiti (IOD) için birbirlerinden belirli uzaklıkta üç konum açısı kullanılmaktadır. Bununla beraber Seesat ekibinin kullandığı Seesat-ELFIND yöntemi (SeeSat Team 2021) iki (veya üç) açı ile çözüm üretebilmektedir.

Bu çalışmada ELFIND yöntemi kullanılmıştır. ELFIND yönteminde f ve g Lagrange fonksiyonları kullanılarak başlangıç konum (r_0) ve hız (v_0) değerlerinden, konum (r) ve hız (v) değerleri hesaplanmaktadır (Denklem 1) (Bate ve diğ. 1971). Denklemde gözlem zamanı, t ; ardışık iki gözlem arasındaki zaman farkı, τ ; yerçekimi sabiti, μ ile gösterilmiştir.

$$r = f(r_0, v_0, t) r_0 + g(r_0, v_0, t) v_0 \quad (1)$$

$$\tau = t - t_0 \quad (2)$$

$$f = 1 - \frac{1}{2}u_0\tau^2 + \frac{1}{2}u_0p_0\tau^3 + \frac{1}{24}u_0(u_0 - p_0^2 + 3q_0)\tau^4 + \dots \quad (3)$$

$$g = \tau - \frac{1}{6}u_0\tau^3 + \frac{1}{4}u_0p_0\tau^4 + \frac{1}{120}u_0(u_0 - 45p_0^2 + 9q_0)\tau^5 + \dots \quad (4)$$

$$u_0 = \frac{\mu}{r_0^3} \quad (5)$$

$$p_0 = \frac{1}{r_0^2}(r_0 \cdot v_0) \quad (6)$$

$$q_0 = \frac{1}{r_0^2}(v_0 \cdot v_0) - u_0 \quad (7)$$

$$r = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(t - t_0)^n}{n!} [F_n r + G_n v]_{t=t_0} \quad (8)$$

$$= r^{(n)} [F_n r + G_n v] \quad (9)$$

$$r = \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tau^n}{n!} F_n \right) r_0 + \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tau^n}{n!} G_n \right) v_0 \quad (10)$$

Denklem 1'in Taylor serisine açılmış hali Denklem 10'da verilmiştir. Bu denklemlerin çözümü ile verilen bir t anında konum hesaplanabilmektedir. Konumun türevinden ise hız elde edilmektedir.

2.2.2 Yörünge İyileştirilmesi

Gözlem verileri içinden seçilen üç farklı nokta kullanarak başlangıç yörünge parametreleri belirlenmiştir. Daha sonra tüm gözlemsel veriler kullanılarak, hassas yörünge belirlenmesi yapılmıştır. Bunun için belirlenen başlangıç yörüngesine En Küçük Kareler Yöntemi (Miller, Steven J. 2021) uygulanarak, tüm gözlem ölçümleri dağılımına göre, başlangıç yörüngesi iyileştirilmiştir.

$$\hat{Y} = a + bX \quad (11)$$

$$\varepsilon = \sum_i (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_i [Y_i - (a + bX_i)]^2 \quad (12)$$

Çizelge 2. TÜRKSAT ve TUG gözlemlerinden elde edilen gözlem verilerinin (ilk 3 kolon) kartezyen koordinatlardaki yörünge sonuçları (sonraki 6 kolon) ve SMA (Semi Major Axis), enlem ve boylam parametreleri olarak yörünge analizi sonuçları (son 3 kolon). Veri Çözümü için 1: TLE, 2: IOD, 3:IOD+LSQ ifadesi kullanılmıştır.

Gözlem Yeri: TÜRKSAT											
Uydu	Çözüm	Tarih (UTC)	X(km)	Y(km)	Z(km)	V _x	V _y	V _z	SMA (km)	Enlem (°)	Boylam (°)
T4A	1	2021-10-26T15:38:13	27965,850	-31548,269	-36,232	2,302	2,039	-0,004	42165,112	0,029	42,047
	2	2021-10-26T15:38:13	27946,580	-31562,992	-10,762	2,302	2,037	-0,002	42143,627	0,064	42,014
	3	2021-10-26T15:38:13	27973,365	-31551,748	-24,534	2,301	2,039	-0,003	42173,197	0,045	42,052
T3A	1	2021-10-26T15:38:13	27972,416	-31561,182	-84,391	2,301	2,038	-0,007	42166,047	-0,036	42,022
	2	2021-10-26T15:38:13	27949,027	-31568,962	-61,375	2,302	2,036	-0,007	42124,794	-0,005	41,991
	3	2021-10-26T15:38:13	27968,644	-31557,265	-80,740	2,302	2,038	-0,007	42155,948	-0,031	42,021
T4A	1	2021-10-28T16:27:46	34943,188	-23594,615	-34,581	1,722	2,547	-0,002	42164,841	0,052	42,071
	2	2021-10-28T16:27:46	35306,529	-23869,937	-69,259	1,687	2,570	-0,008	43057,113	0,006	42,038
	3	2021-10-28T16:27:46	34979,824	-23643,958	-105,843	1,719	2,547	-0,006	42223,844	-0,045	42,043
T3A	1	2021-10-28T16:27:46	34929,070	-23637,406	-108,850	1,723	2,545	-0,005	42165,786	-0,049	42,012
	2	2021-10-28T16:27:46	34537,296	-23405,790	-44,461	1,762	2,521	0,000	41313,038	0,038	41,974
	3	2021-10-28T16:27:46	34893,323	-23586,349	-35,875	1,727	2,546	-0,002	42103,845	0,050	42,042
T4A	1	2021-12-24T15:15:53.9	42059,016	3043,882	-42,947	-0,220	3,066	0,002	42166,532	0,062	42,075
	2	2021-12-24T15:15:53.9	42056,968	3042,224	-44,597	-0,220	3,066	0,002	42156,122	0,060	42,073
	3	2021-12-24T15:15:53.9	42062,329	3048,059	-43,173	-0,221	3,066	0,001	42167,645	0,062	42,080
T3A	1	2021-12-24T15:15:53.9	42058,264	2999,894	-139,234	-0,218	3,067	0,002	42165,859	-0,069	42,015
	2	2021-12-24T15:15:53.9	42056,320	2998,592	-137,757	-0,217	3,067	0,003	42150,372	-0,067	42,014
	3	2021-12-24T15:15:53.9	42061,446	3004,256	-138,500	-0,218	3,067	0,002	42167,293	-0,068	42,021

Gözlem Yeri: TUG											
Uydu	Çözüm	Tarih (UTC)	X(km)	Y(km)	Z(km)	V _x	V _y	V _z	SMA (km)	Enlem (°)	Boylam (°)
T4A	1	2021-10-27T00:45:57.7	888,961	42169,766	-8,342	-3,073	0,064	0,005	42165,062	-0,008	41,973
	2	2021-10-27T00:45:57.7	926,032	42155,077	-9,794	-3,072	0,067	0,002	42107,944	-0,010	41,922
	3	2021-10-27T00:45:57.7	899,612	42166,627	-6,210	-3,073	0,065	0,003	42153,517	-0,005	41,959
T3A	1	2021-10-27T00:45:57.7	913,977	42157,596	-3,090	-3,074	0,065	0,009	42165,997	-0,001	41,939
	2	2021-10-27T00:45:57.7	949,194	42169,793	-18,535	-3,075	0,068	0,008	42219,666	-0,022	41,891
	3	2021-10-27T00:45:57.7	923,360	42153,811	-7,312	-3,073	0,066	0,009	42150,897	-0,006	41,926
T4A	1	2021-10-28T16:26:30.4	34812,526	-23786,792	-34,417	1,736	2,538	-0,002	42164,841	0,052	42,071
	2	2021-10-28T16:26:30.4	34788,832	-23807,997	-20,615	1,738	2,536	-0,002	42152,107	0,070	42,029
	3	2021-10-28T16:26:30.4	34803,600	-23786,349	-34,509	1,737	2,537	-0,002	42154,320	0,051	42,065
T3A	1	2021-10-28T16:26:30.4	34797,653	-23829,422	-107,552	1,738	2,536	-0,006	42165,805	-0,048	42,012
	2	2021-10-28T16:26:30.4	34774,112	-23849,983	-88,523	1,740	2,534	-0,006	42153,103	-0,022	41,971
	3	2021-10-28T16:26:30.4	34788,923	-23828,416	-106,049	1,738	2,535	-0,006	42155,409	-0,046	42,006
T4A	1	2021-12-24T16:58:31.9	36580,146	20997,339	-29,889	-1,529	2,666	0,003	42166,522	0,065	42,063
	2	2021-12-24T16:58:31.9	36573,295	20982,825	-24,665	-1,527	2,666	0,004	42104,308	0,072	42,051
	3	2021-12-24T16:58:31.9	36589,720	20998,782	-30,559	-1,529	2,666	0,003	42179,153	0,064	42,059
T3A	1	2021-12-24T16:58:31.9	36592,519	20959,843	-114,724	-1,527	2,668	0,006	42165,849	-0,051	42,011
	2	2021-12-24T16:58:31.9	36587,112	20946,260	-106,851	-1,526	2,670	0,007	42163,961	-0,040	41,998
	3	2021-12-24T16:58:31.9	36601,499	20961,691	-114,377	-1,528	2,668	0,006	42177,752	-0,050	42,007

Denklem 11 ve 12'de Y bağımlı değişkenin tahmin edilen değeri, X bağımsız değişkeni, a hesaplanan doğrudaki orijinin üzerindeki çizginin yüksekliği, b doğrunun eğimini, ϵ ise minimize edilecek hatayı sembolize etmektedir.

Gözlemsel verilerin astrometrik çözümlerinden, her bir görüntü için hata değeri belirlenmiştir. Olumsuz hava koşulları nedeniyle bazı görüntülerde astrometrik çözüm yapılamamıştır. Yörünge iyileştirmesi aşamasında gözlemsel veriler, hesaplanan hata değerleri ile ağırlıklandırılmıştır. Ağırlık değeri ortalamanın üstünde çıkan noktalar ve ağırlık değeri hesaplanamayan noktalar, yörünge iyileştirilmesinde kullanılmamıştır. Gözlem merkezleri ve gözlem tarihlerine göre uyduların gözlem sayıları, açılal ölçümlere göre ortalama gürültü değerleri ve LSQ filtresine giren gözlem sayısı Çizelge 1'de gösterilmektedir.

Elde edilen yörünge parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelgede Veri Çözümü kolonundaki "TLE" (1) olarak belirtilen

değerler TLE gözlem zamanına ilerletilerek elde edilen yörünge parametrelerini, "IOD" (2) olarak belirtilen değerler başlangıç yörünge değerlerini, "IOD+LSQ" (3) olarak belirtilenler ise LSQ yöntemi kullanılarak iyileştirilmiş yörünge parametrelerini göstermektedir.

3 Sonuçlar ve Yorum

Seçilen uyduların gözlem yapılan tarihlerdeki TLE değerleri Celestrak internet sitesinden alınmıştır. Bu TLE değerleri ve SGP4 (Vallado & Crawford 2008) kullanılarak, gözlem anındaki açılal konum değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan açılal konumlar ile gözlemsel olarak belirlenen açılal konumlar karşılaştırılmıştır (bkz. Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4, Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7, Şekil 8).

ELFIND Başlangıç Yörünge Tespiti yöntemi ile 3 açıdan elde edilen yörünge parametrelerine, ortalama gürültünün

Çizelge 3. TÜRKSAT ve TUG gözlem verilerinin (ilk 3 kolon) yörünge analizi sonucu elde edilen konum, hız, SMA, enlem ve boylam değerlerinin TLE değerleriyle farkları.

Gözlem Yeri: TÜRKSAT							
Uydu	Çözüm	Tarih (UTC)	Konum Farkı (km)	Hız Farkı (10^{-3} km/s)	SMA Fark (km)	Enlem Fark ($^{\circ}$)	Boylam Fark ($^{\circ}$)
T4A	1	2021-10-26T15:38:13					
	2	2021-10-26T15:38:13	1,772	0,654	21,485	-0,035	0,033
	3	2021-10-26T15:38:13	-7,581	0,258	-8,085	-0,016	-0,004
T3A	1	2021-10-26T15:38:13					
	2	2021-10-26T15:38:13	9,724	0,797	41,253	-0,031	0,031
	3	2021-10-26T15:38:13	5,441	-0,028	10,099	-0,005	0,000
T4A	1	2021-10-28T16:27:46					
	2	2021-10-28T16:27:46	-454,940	0,965	-892,259	0,046	0,033
	3	2021-10-28T16:27:46	-57,795	2,062	-58,991	0,097	0,027
T3A	1	2021-10-28T16:27:46					
	2	2021-10-28T16:27:46	454,379	-1,746	852,749	-0,087	0,038
	3	2021-10-28T16:27:46	58,340	-1,996	61,941	-0,099	-0,030
T4A	1	2021-12-24T15:15:53.9					
	2	2021-12-24T15:15:53.9	2,161	0,222	10,410	0,002	0,002
	3	2021-12-24T15:15:53.9	-3,606	0,222	-1,113	0,000	-0,005
T3A	1	2021-12-24T15:15:53.9					
	2	2021-12-24T15:15:53.9	2,036	0,416	15,487	-0,002	0,002
	3	2021-12-24T15:15:53.9	-3,482	0,202	-1,434	-0,001	-0,006
Gözlem Yeri: TUG							
			Konum Farkı (km)	Hız Farkı (10^{-3} km/s)	SMA Fark (km)	Enlem Fark ($^{\circ}$)	Boylam Fark ($^{\circ}$)
T4A	1	2021-10-27T00:45:57.7					
	2	2021-10-27T00:45:57.7	13,888	1,073	57,118	0,002	0,051
	3	2021-10-27T00:45:57.7	2,914	0,209	11,545	-0,003	0,015
T3A	1	2021-10-27T00:45:57.7					
	2	2021-10-27T00:45:57.7	-12,975	-1,008	-53,669	0,021	0,048
	3	2021-10-27T00:45:57.7	3,579	0,290	15,100	0,006	0,013
T4A	1	2021-10-28T16:26:30.4					
	2	2021-10-28T16:26:30.4	7,598	-0,090	12,734	-0,019	0,042
	3	2021-10-28T16:26:30.4	7,619	-0,172	10,521	0,000	0,006
T3A	1	2021-10-28T16:26:30.4					
	2	2021-10-28T16:26:30.4	7,839	-0,108	12,702	-0,026	0,041
	3	2021-10-28T16:26:30.4	7,775	-0,188	10,396	-0,002	0,006
T4A	1	2021-12-24T16:58:31.9					
	2	2021-12-24T16:58:31.9	13,169	1,312	62,215	-0,007	0,012
	3	2021-12-24T16:58:31.9	-9,023	0,197	-12,631	0,001	0,005
T3A	1	2021-12-24T16:58:31.9					
	2	2021-12-24T16:58:31.9	11,462	-0,767	1,888	-0,011	0,012
	3	2021-12-24T16:58:31.9	-8,710	0,201	-11,903	-0,001	0,004

altında kalan tüm gözlem verileriyle LSQ metodu kullanılarak elde edilen iyileştirilmiş kartezyen yörünge parametreleri X, Y, Z ve V_x , V_y , V_z değerleri Çizelge 2'de yer almaktadır. Kartezyen koordinatlar GCRF (Geocentric Celestial Reference Frame) düzlemine aittir. Yörünge sentezinden elde edilen IOD ve IOD+LSQ sonuçlarının kartezyen koordinatlardaki konum ve hız değerlerinin yanı sıra, SMA, enlem ve boylam değerleri Çizelge 2'te gösterilmektedir. Büyüklük olarak uydunun kartezyen koordinatlardaki yörünge parametrelerinin, SMA, enlem ve boylam değerlerinin farkları ise Çizelge 3'te yer almaktadır.

TLE ile gözlenen açılal ölçümler, Şekil 3, Şekil 5, Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'deki grafiklere bakıldığında oldukça tutarlı ve TLE değerlerine göre Sağ Açıklık ve Dik Açıklık için ortalama 0.01° 'ye kadar farkla yakın olduğu görülmektedir. Şekil 4'te ise,

TLE değerleri ile açılal ölçümler arasındaki fark, Sağ Açıklık için ortalama 0.2° , Dik Açıklık için ortalama 0.1° 'dir. Ölçümlerden elde edilen Sağ Açıklık ve Dik Açıklık değerleri, T3A ve T4A uydularının yörünge parametreleri bilinmediği varsayılarak yeni bir gökcisminin yörüngesini tespit etmede kullanılan ELFIND Başlangıç Yörünge Tespiti yöntemi uygulanmıştır. Üç açı ölçümünden elde edilen sonuçlara, gözlem hatası ortalamasının altındaki ölçümlerle yörünge iyileştirilmesi (LSQ yöntemiyle) yapılmıştır. Genel olarak, elde edilen sonuçlarla ertesi gün gözlenen uydu, gözlem ekipmanının görüş alanına girerek takip edilebilmektedir.

Yörünge analiz sonuçlarından yörünge iyileştirmelerinin iyi sonuç verdiği görülmüştür (Çizelge 3). SMA farkı ortalama $\%0.14$ 'tür. 28-29/10/2021 TÜRKSAT gözlemevi gözlem verilerine ait Şekil 4'teki açılal farkların yörünge analiz

sonuçlarına yansıdığı görülmektedir. Bu tarihte SMA farkı IOD'de ortalama %2'den IOD+LSQ ile %0.14'e düşürülmüştür. 24-25/12/2021 tarihindeki TUG'da yapılan gözlemlerde, hava koşullarından dolayı astrometrik hatanın ölçülememesi nedeniyle az veri ile analizler yapılmıştır ve yörünge iyileştirmesi yönteminin diğer gözlem günlerine göre iyi sonuç veremediği tespit edilmiştir.

İlerleyen çalışmalarda, aynı gözlem gününe ait TUG ve TÜRKSAT Yerleşkelerinden elde edilen eşzamanlı veriler kullanarak yörünge analizinin yapılmasının yanı sıra optik ve anten verilerini birlikte kullanarak daha hassas yörünge analizinin gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. TLE ortalama yörünge parametreleri içerdiğinden yörünge parametrelerinde bilinmeyen hata oranı bulunmaktadır. TÜRKSAT antenlerinden mesafe (range) verilerinin alınması durumunda, TLE yerine anten çözümü referans alınarak, gözlem verilerinin karşılaştırması ve daha hassas yörünge analizinin yapılması amaçlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmada 21CT100-1884 numaralı gözlem projesi çerçevesinde sağladığı altyapı ve gözlemsel desteklerinden dolayı TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'ne, yörünge analiz yazılımları desteği için TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü'ne, eşzamanlı astrometrik gözlem desteği sağlayan TÜRKSAT A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Bai X., Xing M., Zhou F., Bao Z., 2009, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47, 2352
- Bate R. R., Mueller D. D., White J. E., 1971, *Fundamentals of Astrodynamics*. Dover Publications, New York
- Calef B., Africano J., Birge B., Hall D., Kervin P., 2006, in Gamiz V. L., Idell P. S., Strojnik M. S., eds, *SPIE Vol. 6307, Unconventional Imaging II*. SPIE, p. 63070E, doi:10.1117/12.683015, <https://doi.org/10.1117/12.683015>
- Campbell T. S., Reddy V., Larsen J., Linares R., Furfaro R., 2018, in Ryan S., ed., *The Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*. p. 12
- Cardona T., Seitzer P., Rossi A., Piergentili F., Santoni F., 2016, *Advances in Space Research*, 58, 514
- Choi J., ve diğ., 2015, *Advances in Space Research*, 56, 1056
- Gaia Collaboration ve diğ., 2018, *A&A*, 616, A1
- Guo X., Gao P., Shen M., Yang D., Yu H., Liu T., Li J., Zhao Y., 2020, *Advances in Space Research*, 65, 1990
- Kaasalainen M., Torppa J., 2001, *Icarus*, 153, 24
- Kaasalainen M., Torppa J., Muinonen K., 2001, *Icarus*, 153, 37
- Miller, Steven J. 2021, *The Method of Least Squares*, https://web.williams.edu/Mathematics/sjmiller/public_html/BrownClasses/54/handouts/MethodLeastSquares.pdf
- Montojo F. J., López Moratalla T., Abad C., 2011, *Advances in Space Research*, 47, 1043
- Park J.-H., ve diğ., 2018, *Advances in Space Research*, 62, 152
- Piergentili F., Santoni F., Seitzer P., 2017, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 53, 81
- Rossi A., Marinoni S., Cardona T., Dotto E., Fabio S., Fabrizio P., 2012, in *Sixty third international astronomical congress*, 2012. 63rd International Astronautical Conference
- SeeSat Team 2021, ELFIND Method, <http://sat.belastro.net/satelliteorbitdetermination.com>
- Vallado D., Crawford P., 2008, SGP4, doi:10.2514/6.2008-6770
- Vananti A., Schildknecht T., Krag H., 2017, *Advances in Space Research*, 59, 2488
- Vereš P., Jedicke R., Denneau L., Wainscoat R., Holman M. J., Lin H.-W., 2012, *PASP*, 124, 1197

Yanagisawa T., Kurosaki H., 2012, *Advances in Space Research*, 50, 136

Access:

M23-0349: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.