

GÜNEŞ SENKRONİZE VE TEKRARLI YER İZİNE SAHİP DONUK YÖRÜNGE TASARIM ARACI

Uzay Tuğcular¹, Berkay Daşer² ve Alper Akgül³
Türk Havacılık Uzay Sanayii, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada güneş senkronize ve tekrarlı yer izine sahip donuk dairesel yörüngeleri tasarlayabilen bir yazılım geliştirilmiş, matematiksel temelleri açıklanmış ve kullanıcılar için bir arayüz oluşturulmuştur. Bu bağlamda oluşturulan yazılım Java tabanlı olup OREKIT 10.0 kütüphanesi kullanılarak yazılmıştır. Çalışmanın temel hedefi, “FreeFlyer Demo V7.5” programı içerisinde bulunan “Güneş Senkronize Tekrarlı Yer İzi Yörünge Tasarım Sihirbazının” hesapladığı yörünge verisini açık kaynak kodlu kütüphaneler ve literatürde sıklıkla kullanılan hesaplamalar ile üretmek, bu sayede ticari yazılım bağımlılığını ortadan kaldırmaktır. Yazılım içindeki algoritma, OREKIT 10.0 kütüphanesinde bulunan örnekler yardımıyla “FreeFlyer” algoritmasına yakınsanmıştır. Yazılım çıktıları olan “Ekvatorial Geçiş Noktaları” ve “Gök günlüğü”, “FreeFlyer” çıktıları ile karşılaştırılmış, hata analizi yapılarak sonuçların tutarlılığı gösterilmiştir

GİRİŞ

Temelde bir uydunun güneş senkronize ve tekrarlı yer izine sahip dairesel bir yörüngede olmasının sebebi; güç kısıtları, görev yükünün aktif olarak güneş ışığına ihtiyaç duyması ve Dünya’nın tümünü tarayabilecek bir sistem istenmesi olarak sıralanabilir. Askeri, ticari ve bilimsel amaçla oluşturulan bu yörüngelerin kullanımı Türkiye’de de gün geçtikçe artmaktadır. Bu tip uydulara örnek olarak GÖKTÜRK-1 verilebilir. Operasyonel anlamda devamlı olarak güneş senkronizasyonun ve yer izi tekrarının korunmasını gerektiren bu özel yörüngeler sürekli olarak uydu takibi gerektirmekte ve çeşitli hesaplamaları da beraberinde getirmektedir.

Bu çalışmanın hedeflerinden biri operasyonel hesaplama işlemlerinin yapıldığı yazılımların ticari bağımlılığını ortadan kaldırmak ve bu kapsamda bir Güneş senkronize ve yer izi tekrarlı dairesel donuk yörünge tasarım aracı geliştirmektir. Yakın gelecek için planlanan yer gözlem uydu projelerinde kullanılabilecek olan bu tasarım aracı Türkiye’de ileriki dönemde daha çok ihtiyaç duyulacak olan fonksiyonların, ücretli yazılımlara alternatif olarak tamamen açık kaynak kodlu yazılımlar ve literatür bilgileri kullanarak yerli tasarımlar ile geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Güneş senkronize ve tekrarlı yer izine sahip donuk yörüngeler, yer gözlem uydularında “Gerçek Yörüngeler” için operasyonel anlamda kullanılabilen bir referanstır. Gerçek yörüngeler; uydu üzerine etkiyen bütün tedirgeme kuvvetleri sonucu oluşan yörüngelerdir. Bu tip referans yörüngelerin oluşturulması için tedirgeme kuvvetlerinden teorik anlamda güneş senkronizasyonunu, yer izi tekrarını ve donuk eksantrikliği sağlamak adına yararlanılır. Bu bağlamda “Yerçekimi Potansiyel Alanlarından” kaynaklanan tedirgeme kuvvetleri kullanılır. Etki eden bu tedirgeme kuvvetleri sonucunda elde edilen yörünge en uygun güneş senkronize ve tekrarlı yer izine sahip yörünge olduğu kabul edilir.

Güneş senkronize ve yer izi tekrarlı donuk yörünge tasarımı “Tekrar Devresi”, “Yörünge Sayısı” ve “Yükseliş Düşümündeki Ortalama Hedef Zaman (Hedef MLTAN)” girdileri ile başlar. Tekrar devresi bir uydunun kaç gün içerisinde başladığı ekvator noktasına döneceğini belirten bir sayı olup, yörünge sayısı tekrar devresi içinde uydunun yörüngede kaç defa döndüğüdür. Tasarım süreci

¹ Yer Sistemleri Tasarım Mühendisi, uzay.tugcular@tai.com.tr

² Yer Sistemleri Tasarım Mühendisi, berkay.daser@tai.com.tr

³ Yer Sistemleri Tasarım Mühendisi, alper.akgul@tai.com.tr

doğası gereği iteratif bir işlemdir ve kısa sürede yakınsaması adına analitik bir tahmin ile başlatılmalıdır. Bu gibi durumlarda analitik bir tahmin için klasik yörünge mekaniğinden yararlanılmaktadır. Devamında “Yer İzi Fazının” (uydunun her yükseliş düğümünden geçerken ekvatorda bıraktığı noktalar arası mesafelerdir) iyileştirilmesi işlemi yapılarak yeni bir yörünge elde edilmiş olur [Vallado, 2013]. Bu yeni yörünge “Güneş Senkronizasyon İşlemine” girdi olarak gönderilir ve yer izi fazı iyileştirilmiş yörünge için güneş senkronizasyon işlemi gerçekleştirilir [Vallado, 2013]. Bu işlem sonucunda da çıktı olarak yeni bir yörünge elde edilmiş olur. Tasarımın bir sonraki evresinde yörünge için donuklaştırılması vardır. Donuk yörüngeler, ikinci ve üçüncü küresel harmonik dereceleri kullanılarak elde edilen tedirgeme kuvvetleri sayesinde zamana bağlı yavaş bir eksantriklik değişim içerisindedirler [Vallado, 2013]. Bu sayede yörünge eksantrikliği harmonik bir şekilde kendini tekrar edebilmektedir.

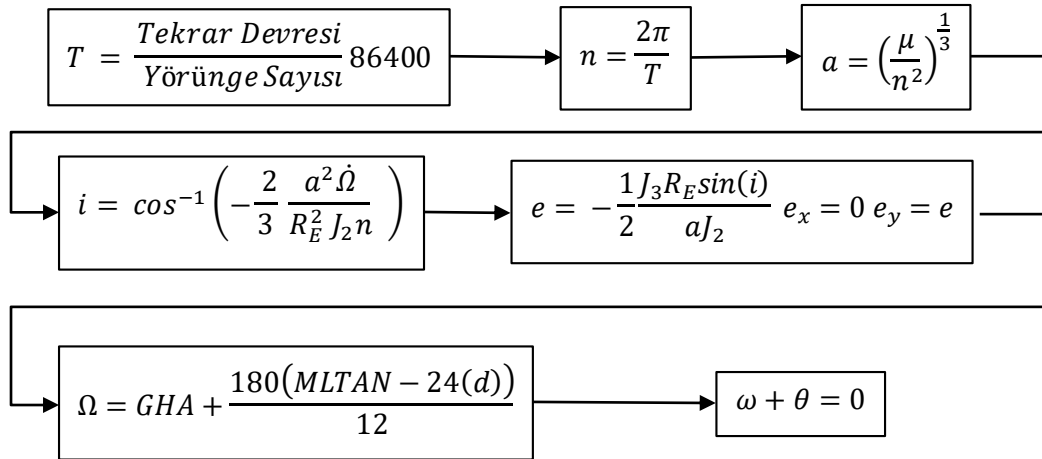
YÖNTEM

Bu çalışmada güneş senkronize ve yer izi tekrarlı dairesel donuk yörünge tasarım algoritması icra edilmiş ve kullanıcı ara yüzü ile birleştirilerek bir tasarım aracı haline getirilmiştir. Temel olarak OREKIT 10.0 Uçuş Dinamikleri kütüphanesinden yararlanılmıştır [Maisonobe, 2010]. Bu bölümde tasarım aracı içerisindeki algoritma üzerinde durulacak ve tasarımın matematiği aktarılacaktır.

Tasarım aracı kullanıcıdan girdi olarak başlangıç zamanı, tekrar devresi, yörünge sayısı ve hedef MLTAN değerlerini almaktadır. Başlangıç zamanı tasarlanan yörünge için başlangıç tarihini ve ilk yükseliş düğüm açısını belirlerken; tekrar devresi, yörünge sayısı ve hedef MLTAN değerleri güneş senkronize tekrarlı yörüngeler için gerekli olan temel parametrelerdir.

Tekrarlı yer izi ve güneş senkronize donuk yörüngeler genellikle dinamik model olarak Dünya'nın yerçekimi potansiyeli ile oluşan tedirgemeler kullanılarak tasarlanmaktadır. Bu çalışmada uydu dinamik modeli ikinci ve üçüncü dereceden küresel harmonik etkiler (J_2 ve J_3) kullanılarak oluşturulmuştur.

İlk adım olarak yörünge hakkında teorik bir tahminde bulunulması gerekmektedir. İlk tahmin, bir sonraki adımda doğrudan kullanılacağından hesaplamaların yapılabilmesi için büyük önem arz etmektedir.



Şekil 1: İlk Tahmin Algoritması

T yörünge periyodunu, n ortalama hareketi, a yarı asal eksen, i yörünge eğikliği, e eksantrikliği, Ω yükseliş düğümünü, GHA Greenwich Saat Açısını, d referans zamanının saat kısmının güne çevrilmiş halini, $\omega + \theta$ ise yerberi açısını ve gerçek ayrıklığın toplamını tanımlamaktadır.

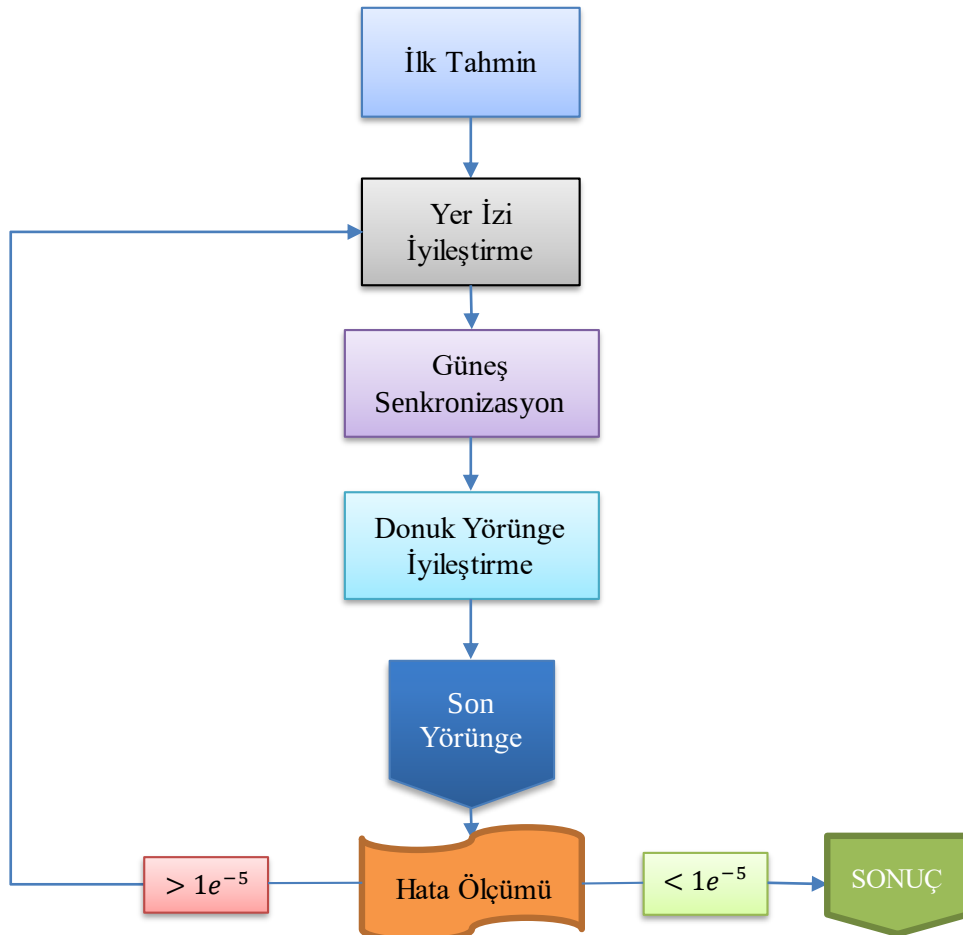
İlk tahmin için yörünge eğikliği, Güneş Senkronizasyonu için gerekli olan J_2 tedirgeme etkileri ile hesaplanmıştır. e_x değeri 0 kabul edilmiş ve e_y değeri donuk yörünge tedirgeme etkileri varsayımı ile hesaplanan eksantriklik değerine eşitlenmiştir. Yükselme düğüm açısı ise verilen referans zamanında, ECEF koordinat sistemine göre hesaplanmıştır. $\omega + \theta$ değeri 0 kabul edilerek, ilk tahmin değeri yükseliş düğüm noktasında tanımlanmıştır.

Sıradaki adımda uydunun yer izi tekrar deseni iyileştirilerek ilk yapılan tahmin güncellenmektedir. Bu işlem ile uydu yer izi kendini tekrarlayan bir hale gelmektedir. Yer izi tekrarı, yarı asal eksene bağlı olarak değişmektedir. Bunun için oluşturulan uydu dinamik modeli, Prince-Dormand8(53) numerik yöntemi kullanılarak verilen yörünge sayısı için her ekvator geçişlerine ilerletilir. Bu geçişler arası mesafeler incelenerek yeni bir yarı asal eksen bulunur. Numerik integrasyon hataları ve ilk tahminin mükemmel olmaması sebebiyle istenilen düzeyde bir tekrar mekanizması iteratif bir süreç izlenmediği sürece elde edilememektedir.

Bir sonraki adımda ise yer izi tekrarı iyileştirilen yörünge güneş senkronizasyonu açısından işleme alınmaktadır. Bu adımda yörünge'nin güneş senkronizasyonu iyileştirilmektedir. Güneş senkronizasyonu uydunun yörünge eğikliğine göre değişmektedir. İstenilen MLTAN değeri için analitik olarak ilk tahminde hesaplanan yörünge eğikliği bu adımın yakınsamasını hızlandırmaktadır. Bu işlem için öncelikle uydu Prince-Dormand8(53) numerik yöntemi kullanılarak yükseliş düğümüne verilen yörünge sayısı için ilerletilmektedir. Her yükseliş düğümü geçişinde elde edilen MLTAN değerleri hesaplanır ve uzun dönem periyodik (harmonik) etkiler kullanılarak bir ortalaması alınır. Son iki adımda biriken hatalar sebebi ile bu adımda elde edilen sonuçlar yeterli değildir.

Son adımda donuk yörünge prensipleri kullanılarak yörünge'nin eksantrikliği ayarlanmaktadır. Bu işlem $\vec{e}$ bileşenlerinin Dünya'nın basırlığından kaynaklanan seküler ve harmonik değişimler bir fonksiyona yakınsanmasıyla gerçekleştirilir. Daha sonra istenilen tarihteki $\vec{e}$ değeri bu fonksiyon kullanılarak bulunur.

Tasarım sürecini iteratif bir hale getiren kısım ise son adımdan sonra başlamaktadır. Elde edilen son yörünge tekrar yer izi iyileştirme algoritmasına gönderilir ve bütün iyileştirme algoritmaları tekrar çağrılır. Böylece başlangıçta yeterli olmayan sonuçlar iteratif bir şekilde iyileştirilerek yeterli hale getirilir. Seçilen bir hata marjini ile iterasyon durdurulur ve gök günlüğü dosyası hazırlanarak kullanıcı ile paylaşılır.



Şekil 2: İterasyon Şeması

UYGULAMALAR ve DEĞERLENDİRME

Bu bölümde geliştirilen kullanıcı ara yüzü tanıtılmış ve program sonuçları “FreeFlyer Demo V7.5” uygulaması ile karşılaştırılmıştır.

İlk olarak ara yüz üzerinde bulunan girdiler açıklanmış ve program özelliklerinden bahsedilmiştir. Takip eden alt başlıkta, öncelikle program çıktıları tanıtılmıştır. Şekil-2’de belirtilen algoritma sonucu yakınsayan “Son Yörünge” parametreleri üzerinde hata analizi yapılmış, ALOS, Landsat-5, ENVISAT ve IRS-1A uyduları için “FreeFlyer Demo V7.5” programında yer alan “Güneş Senkronize Tekrarlı Yer İzi Yörünge Tasarım Sihirbazının” çıktıları, Java ortamında yazılan program çıktıları ile karşılaştırılmıştır.

Kullanıcı Arayüzünün Tanıtılması

Arayüzde, kullanıcıya “Yeni Yörünge Tasarla” ve “Tasarlanmış Yörüngeyi Devam Ettir” şeklinde iki seçenek sunulur. Eğer kullanıcı yeni yörünge tasarlama seçeneğini kullanıyorsa, kullanıcıdan İlk Yükseliş Düşüm Geçiş Zamanı, yörünge sayısı, tekrar devri, hedef MLTAN, uydu kütlesi ve gök günlüğü süresi değerlerini girmesi istenir ve oluşturulan yeni yörünge kullanıcının belirlediği dosya yoluna oluşturulur. Kullanıcı arayüzünde uydu kütlesi de bir girdi olarak alınmaktadır. Bu çalışma ileride “Tusaş Uydu Komuta Kontrol yazılımları” ile entegre olarak kullanılacağından kütle bilgisi ara yüze dahil edilmiştir.

Eğer kullanıcı “Tasarlanmış Yörüngenin Devam Ettir” seçeneği kullanılıyorsa, program kullanıcıdan devam ettirilecek gökgünlüğü dosyası girdi olarak bekler.

Şekil 3: Kullanıcı Arayüzü.

Program Çıktıları

Bu bölümde program çıktı formatları detaylandırılmıştır. JAVA ortamında yazılan programın hata analizi, “FreeFlyer Demo V7.5” ile yapılan test sonuçlarıyla icra edilmiştir.

Program çıktıları “Gök Günlüğü” ve “Grid” dosyaları olmak üzere iki adettir. Gök Günlüğü formatının “FreeFlyer” formatı ile aynı olması amaçlanmış, Grid dosyası ise karşılaştırılma yapılan programda çıktı olarak verilmediği için özel bir format oluşturulmuştur.

Temel olarak Gök Günlüğü dosyasında kullanıcı tarafından girilen “Gök Günlüğü Süresi” boyunca elde edilen zaman etiketli uydu konum-pozisyon vektörleri, koordinat sistemi ve zaman tanımları gibi bilgiler bulunmaktadır.

Grid dosyasında ise uydunun her yükseliş düğüm geçişinde, ECEF'e göre hesaplanmış zaman etiketli boylam değerleri bulunmaktadır. Bu boylam değerleri uydunun tekrarlı yer izi desenini ve tekrar kabiliyetinin anlaşılmasına yardımcı olmaktadır.

Aşağıdaki tabloda ALOS, Landsat-5, ENVISAT ve IRS-1A uyduları için “Yörünge Sayısı”, “Tekrar Devresi” ve “Hedef MLTAN” değerleri verilmiştir.

Tablo 1: Tekrarlı Yer İzi Güneş Senkronize Yörünge Parametreleri

	ALOS	Landsat-5	ENVISAT	IRS-1A
Yörünge Sayısı	671	233	501	307
Tekrar Devresi	46	16	35	22
MLTAN	22:30	21:30	22:00	22:00

Hata Analizi: Bu başlık altında ALOS, Landsat-5, ENVISAT ve IRS-1A uyduları için elde edilen sonuçların tekrarlı yer izi (TYİ) ve güneş senkronizasyon (GS) hataları analiz edilmiştir. Tablo-1'e göre istenilen yörüngeler tasarlanmış ve elde edilen yörüngenin tutarlılığı gösterilmiştir.

TYİ hatası, uydunun ilk yükseliş düğümü geçişindeki boylam noktası ile (yörünge sayısı+1) geçişindeki yükseliş düğümü boylam noktası arasındaki fark olarak tanımlanmış, TYİ mesafe hatası ise TYİ hatasının milimetre cinsinden yazılmış halidir. GS hatası, teorik güneş senkronizasyonu için gerekli olan yükseliş düğümü değişimi ile hesaplanan son yörüngedeki düğüm değişimi arasındaki farkı ifade etmektedir.

Tablo 2: Güneş Senkronizasyon ve Tekrarlı Yer İzi Hataları

	ALOS	Landsat-5	ENVISAT	IRS-1A
TYİ Hatası (°)	2.987e-11	2.744e-11	1.184e-11	3.476e-12
TYİ Mesafe Hatası (mm)	0.190	0.175	0.075	0.022
GS Hatası (°/s)	1.197e-6	1.192e-6	1.137e-6	1.06e-6

FreeFlyer ile Karşılaştırma: Bu başlık altında FreeFlyer çıktıları olan Gök Günlüğü ve son yörünge parametreleri, geliştirilen program çıktıları ile karşılaştırılmıştır. Referans zamanı olarak 01.03.2019 12:00:00.000 tarihi seçilmiş ve Tablo-1'deki değerlere göre hesaplamalar yapılmıştır. Aşağıdaki Tabloda FF, FreeFlyer'ı, RYA ise yazılmış olan Güneş senkronize ve yer izi tekrarlı dairesel donuk yörünge tasarım aracını (Referans Yörünge Aracı) ifade etmektedir.

Tablo 3: FreeFlyer ve Referans Yörünge Aracı ile Elde Edilen Yörüngelerin Karşılaştırılması

	ALOS		LandSat-5		ENVISAT		IRS-1A	
	FF	RYA	FF	RYA	FF	RYA	FF	RYA
a (km)	7078.947	7078.946	7086.863	7086.863	7168.504	7168.503	NaN	7291.106
a_{Hata}	1.221e-3		4.305e-04		8.904e-04		NaN	
e	0.001138	0.001138	0.001057	0.001057	0.001114	0.001114	NaN	0.001091
e_{Hata}	1.252e-07		8.689e-08		1.187e-07		NaN	

Tablo 4: FreeFlyer ve Referans Yörünge Aracı ile Elde Edilen Yörüngelerin Karşılaştırılması(Devamı)

i°	98.226	98.226	98.276	98.276	98.606	98.606	NaN	99.133
i°_{Hata}	1.675e-04		8.180e-05		1.614e-04		NaN	
θ°	293.522	293.524	292.420	292.420	293.339	293.340	NaN	292.786
θ°_{Hata}	1.937e-3		3.179e-04		1.576e-3		NaN	
ω°	66.477	66.476	67.579	67.579	66.660	66.659	NaN	67.214
ω°_{Hata}	1.937e-3		3.179e-04		1.576e-3		NaN	
Ω°	136.271	136.271	121.269	121.268	128.770	128.770	NaN	128.771
Ω°_{Hata}	2.462e-04		3.511e-04		2.765e-04		NaN	
λ_1	157.494	157.494	142.496	142.496	149.995	149.995	NaN	149.995
λ_{Hata}	1.369e-04		4.334e-05		1.149e-04		NaN	
Referans Zamanı	01 Mart 2019 12:00:00:00.000							

Geliştirilen Referans Yörünge Tasarım aracının çıktılarının FreeFlyer programının çıktıları ile karşılaştırılması adına Güneş senkronize tekrarlı yer izine sahip ALOS, LandSat-5, ENVISAT ve IRS-1A uyduları seçilmiştir. Tablo 3'te görüldüğü üzere, seçilen bu uydular için FreeFlyer ve Referans Yörünge Aracının verdikleri sonuçlar arasındaki farklar; yarı asal eksen değerlerinde 10^{-3} ve 10^{-4} , eksantriklik değerlerinde 10^{-4} ve 10^{-5} , eğiklik değerlerinde 10^{-4} ve 10^{-5} , gerçek ayıklık açıları 10^{-3} ve 10^{-4} , yerberi açıları 10^{-3} ve 10^{-4} , yükseliş düğüm açıları 10^{-4} ve ilk yükseliş düğümündeki boylam değerlerinde 10^{-4} ve 10^{-5} mertebelerinde elde edilmiştir. IRS-1A uydusu için FreeFlyer programından bir sonuç alınamamış olup hata analizi gerçekleştirilememiştir. Seçilen bu uydular için elde edilen en yüksek hata değeri 1.937×10^{-3} ile ALOS uydusunun gerçek ayıklık ve yerberi açısı için, en düşük hata değeri ise 8.689×10^{-8} ile LandSat-5 uydusu için eksantriklik değeri için elde edilmiştir. Bütün uydular için yerberi ve gerçek ayıklık açılarındaki hataların aynı olmasının sebebi dairesel yörünge yaklaşımıdır.

SONUÇ

Bu çalışmada bir Güneş senkronize ve tekrarlı yer izine sahip donuk yörünge tasarım aracı JAVA ortamında OREKIT 10.0 kütüphanesi kullanılarak geliştirilmiştir. Bu aracın, "FreeFlyer Demo V7.5" programı içerisinde bulunan "Güneş Senkronize Tekrarlı Yer İzi Yörünge Tasarım Sihirbazının" ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda yazılan "Güneş Senkronize ve Yer İzi Tekrarlı Dairesel Donuk Yörünge Tasarım Aracı" kullanıcıdan girdi olarak başlangıç zamanı, tekrar devresi, yörünge sayısı ve Hedef MLTAN değerlerini alıp FreeFlyer gök günlüğü dosya formatında tekrar devresi süresince ilerletilmiş gök günlüğü dosyası üretmektedir.

Uygulamanın doğruluğunu kontrol etmek amacıyla ALOS, ENVISAT ve IRS 1A uydularının Güneş senkronize ve tekrarlı yer izine sahip yörüngeleri hem FreeFlyer ortamında hem de yazılan tasarım aracında elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucu, program çıktılarının birbirlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir. IRS-1A uydusu için FreeFlyer tarafından herhangi bir sonuç alınamamıştır.

Çalışmanın devamında tasarım aracı içinde kullanılan iyileştirme algoritmaları geliştirilecek ve kullanıcı arayüzü iyileştirilecektir. Devamında TUSAŞ bünyesinde geliştirilen Uydu Komuta Kontrol yazılımları ile entegrasyonu sağlanacaktır.

Kaynaklar

Maisonobe, L., Fernandez-Martin, C., 2010. *Sharing the Knowledge: An Open-Source Vision for Flight Dynamics*, SpaceOps, Alabama, 25-30 Nisan.

Vallado, D. A., 2013. *Fundamentals of Astrodynamics and Applications*, Space Technology Library, 4. Baskı, s.862-888.