

BİR KÜP UYDU AY GÖREVİ İÇİN ÖN YÖRÜNGE TASARIMI

Mehmet Fatih Ertürk¹
İstanbul Teknik Üniversitesi,
İstanbul

Şahin Ulaş Köprücü²
Orta Doğu Teknik Üniversitesi,
Ankara

Mohammad Mehdi Gomroki³
Nevsan Şengil⁴
Tahsin Çağrı Şişman⁵
Mecit Yaman⁶
Türk Hava Kurumu
Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Bu çalışmada alçak Dünya yörüngesindeki, yüksek özgül itme ile düşük itki kuvvetine sahip bir itki sistemi ile donatılmış bir küp uydunun, düşük enerjili yörünge transferini kullanarak Ay'a erişmesi için gerekli olan yakıt miktarı, parçacık sürü optimizasyonu yardımıyla elde edilmiştir. Ayrıca spiral transfer yöntemi de incelenmiş, yakıt ve süre bakımından düşük enerjili yörünge transferi ile karşılaştırılmıştır.

GİRİŞ

Küp uydular bir standarda oturmuş olan tasarım yapılarıyla günümüzde uzay görevleri için yaygın uygulama alanına sahip olan bir uydur sınıfıdır. Küp uydular, daha az maliyetli uzay görevlerini mümkün kıldıkları için kullanımları gün geçtikçe artmaktadır.

Alçak Dünya yörüngesindeki (ADY'deki) görevler küp uydur misyonlarının ana hedefi olsa da küp uydular ile derin uzay görevleri planlanmakta ve gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda derin uzay görevlerinin bir küp uyduryla gerçekleştirilebileceğini kanıtlayan ilk görev Mars Cube One (MarCO) olmuştur [NASA, 2020]. Yakın gelecekte Ay'a düzenlenecek Artemis-1 görevi ise Ay yolunda taşıdığı 13 uyduryla, küp uyduların kullanım alanlarının genişlemesine katkı sağlayacaktır [NASA, 2019].

MarCO, NASA'nın InSight göreviyle Mars'a gönderdiği iki adet 6U'luk küp uydudan oluşmaktadır. 2018 yılında fırlatılan uydular, Mars görevlerinde atmosfere giriş, alçalış ve iniş olarak bilinen en zorlu anlarda yaşanan iletişim kopukluğunu engellemek ve uzay aracıyla iletişimi kesintisiz olarak devam ettirebilmek amacıyla tasarlanmıştır.

¹Öğrenci, Savunma Teknolojileri Pr., E-posta: erturkm19@itu.edu.tr

²Öğrenci, Fizik Böl., E-posta: ulas.koprucu@metu.edu.tr

³Dr. Öğr. Üyesi, Uçak Müh. Böl., E-posta: mmgomroki@thk.edu.tr

⁴Prof. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: nsengil@thk.edu.tr

⁵Doç. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: tcsisman@thk.edu.tr

⁶Doç. Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: myaman@thk.edu.tr

Ay görevlerinin, hem gelecek Mars görevleri hem de Ay'daki olası kolonizasyon çalışmaları nedeniyle tekrar popülerliğini kazandığı günümüzde, NASA tarafından planlanan Artemis-1 görevi bu yolda önemli bir adım olarak gözükmektedir. Ay'a gerçekleştirilecek bu görev sırasında birincil yük olan uzay aracının yanı sıra ikincil yük olarak 13 adet küp uydu da bulunacaktır. Bu küp uydulardan birisi olan Lunar IceCube'ün transfer yörüngesi tasarımı [Folta ve diğerleri, 2016]'da incelenmiştir ve bu çalışmanın konusu ile benzerlik göstermesi nedeniyle dikkat çekmektedir. Tüm bu küp uyduların yerine getirecekleri bilimsel araştırmalar, Ay'a ve ötesine olan yolculuklara katkılarının yanı sıra, Dünya yörüngesi dışında gerçekleşecek küp uydu görevlerinin nasıl tasarlanması ve icra edilmesi gerektiği konusunda da yol gösterici olacaktır. Ay'a ve derin uzaya açılan bu yeni pencere, küp uyduların ADY'nin ötesine ulaşımını kolaylaştırıp yaygınlaştıracaktır.

Ülkemizin ADY'ye erişim için fırlatma sistemi çalışmaları devam etmekte ve önümüzdeki yıllarda sonuç alınması beklenmektedir. Böyle bir fırlatma imkanı ile ülkemizde planlanan küp uydu sistemlerinin uzaya erişimi yerli imkanlarla da mümkün olacaktır. Bu çalışmada böyle bir erişim imkanı ile birlikte ADY'ye erişen bir küp uydu için düşük enerjili Ay transfer yörüngesine dair ön yörünge tasarımları gerçekleştirilecektir.

Elektrik iticiler, yüksek özgül itme değerlerine sahip olmaları nedeniyle tercih edilen bir itki sistemidir. Bu iticiler kimyasal yakıtlı itki sistemlerine kıyasla daha az yakıt ve dolayısıyla daha az kütle gerektirmektedirler. Buna karşın uyguladıkları düşük itki kuvveti, elektrik iticilerin uzun süreli kullanımını mecbur kılmakta ve yörünge transfer süresini uzatmaktadır. Elektrik itki sistemlerinin boyutlarının giderek küçülmesi, bu sistemleri küp uydular için kullanışlı birer itki sistemi yapmaktadır. Böylelikle düşük uydu kütlesi ve düşük yakıt miktarıyla, daha az maliyetli uzay görevleri mümkün hale gelmektedir. Bu nedenle bu çalışmada elektrik itki sistemine sahip bir küp uydu incelenmiştir.

Yörünge transfer yöntemi olarak Hohmann transferi sıklıkla kullanılan ve tecrübe edilmiş bir transfer yöntemidir. Bu yöntemde gerekli olan hız değişim miktarı, ayrı ayrı incelenen iki cisim problemleri çerçevesinde hesaplanır. Ay görevi özelinde düşünersek, iki ayrı iki cisim problemi bulunmaktadır. Bunlar, Dünya-uydu ve Ay-uydu sistemleridir. Hohmann transferi, çok kısa bir zaman aralığında yüksek miktarda itki gerektirmesi nedeniyle kimyasal yakıtlı itki sistemlerine daha uygun bir yöntemdir. Bu yöntemin bir küp uydu için uygulanabilirliğini düşünersek, küp uydunun kimyasal yakıtlı itki sistemine sahip olması gerektiği, kısa zamanda yüksek itki ihtiyacı nedeniyle açıktır. Kimyasal itki sistemine sahip bir küp uydunun yakıt miktarının fazlalığı uyduyu nano uydu kategorisinden çıkartıp mikro uydu kategorisine sokmaktadır. Bunun yanı sıra Hohmann transferinin gerektirdiği kısa zamanda yüksek itki ihtiyacı, büyük itki motorlarını gerekli kılmaktadır. Bu büyük itki motorları da bir küp uyduya uygulanabilir değildir. Tüm bu nedenlerden dolayı bir küp uydu Ay görevi için başka bir transfer yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada alternatif transfer yöntemi olarak, Belbruno [Belbruno ve Miller, 1993] tarafından ortaya atılan düşük enerjili yörünge transferi ve spiral transfer incelenmiştir.

Düşük enerjili yörünge transferi, Hohmann transferine kıyasla daha az yakıt gerektiren bir yöntemdir. Bu yöntem iki ayrı iki cisim problemi yerine, Dünya-Güneş-uydu ve Dünya-Ay-uydu olmak üzere iki ayrı üç cisim problemi [Koon ve diğerleri, 2001] çerçevesinde ya da Güneş-Dünya-Ay-uydu olmak üzere dört cisim problemi [Belbruno ve Miller, 1993] çerçevesinde incelenir. Bu sistemlerin dinamik yapısı, Hohmann transferine kıyasla daha az Δv ile Ay'ın etrafında yörüngeye girmeyi mümkün kılmaktadır. Bu bağlamda Hohmann transferine kıyasla daha az yakıt gerektirmektedir. Düşük enerjili yörünge transferinin kısa zamanda yüksek itki ihtiyacı içermemesi, bu yöntemi elektrikli itki sistemleri için kullanışlı yapmaktadır. Elektrik iticilerin boyutlarının giderek küçülmesiyle birlikte düşük enerjili yörünge transferi bir küp uydu Ay görevi için ideal bir transfer yöntemi olarak gözükmektedir.

ADY'deki bir küp uydunun Ay görevini gerçekleştirip gerçekleştiremeyeceğine dair yapılması gereken ilk analiz, küp uyduya sahip olduğu itki sistemleri ile Ay transfer yörüngesine girmek için gerekli ilk Δv 'nin olurlu bir şekilde verilip verilemeyeceğidir. Bunun için cevaplanması gerekli iki önemli soru elektrik itki kullanılması planlanan küp uyduya bu ilk Δv artışının sağlanması için ne kadar yakıt gerekeceği ve bu Δv artışının ne kadar sürede gerçekleştirilebileceğidir.

Öncelikle bu ilk Δv 'nin mertebesini analiz edelim. ADY'deki küp uydunun 200 km irtifada çembersel bir yörüngede Dünya etrafında dönüyor olduğu kabul edilirse, bu uydunun sahip olması gereken sürat

$$v(r) = \sqrt{\frac{\mu_E}{r}}, \quad (1)$$

ile bulunabilir. Bu denklemde μ_E Dünya ve uydu iki-cisim sistemi için kütleçekim parametresidir ve $398.600 \text{ km}^3/\text{s}^2$ değerine sahiptir. İrtifa 200 km iken $r = 6578 \text{ km}$ değerini denklemde yerine koyduğumuzda sürat $v(r = 6578 \text{ km}) = 7,784 \text{ km/s}$ değerini alır. Bu yörünge sürati ve yarıçapı değerleri için özgül yörünge enerjisi

$$\varepsilon(r) = \frac{v^2}{2} - \frac{\mu_E}{r}, \quad (2)$$

denklemini ile $\varepsilon(r = 6578 \text{ km}) = -30,30 \text{ MJ/kg}$ olarak hesaplanır. Ay, Dünya'nın etrafında yarı-büyük eksen $a = 384.400 \text{ km}$ olan bir yörüngede döner. Yarıçapı bu değerle aynı olan çembersel bir yörüngede dönen bir uydunun sürati (1) ifadesinden $v(r = 384.400 \text{ km}) = 1,018 \text{ km/s}$ ve özgül enerjisi (2) ifadesinden $\varepsilon(r = 384.400 \text{ km}) = -0,5185 \text{ MJ/kg}$ olarak bulunur. Bu sonuçları kullanarak, irtifası 200 km olan bir küp uyduya $r = 384.400 \text{ km}$ yarıçaplı bir çembersel yörüngede dönebilmesi için verilmesi gereken Δv değeri

$$\frac{[v(r = 6578 \text{ km}) + \Delta v]^2}{2} - \frac{\mu_E}{6578 \text{ km}} = \varepsilon(r = 384.400 \text{ km}), \quad (3)$$

ifadesinden $\Delta v = 3,18 \text{ km/s}$ olarak bulunur. Bulunan bu Δv değeri ile $[v(r = 6578 \text{ km}) + \Delta v] = 10,96 \text{ km/s}$ olarak bulunur ki bu değer doğal olarak 200 km irtifa için kaçış hızı olan $v_{\text{kaçış}}(r = 6578 \text{ km}) = 11,01 \text{ km/s}$ değeriyle aynı mertebededir.

Ay transfer yörüngesine girmek için gerekli $\Delta v = 3,18 \text{ km/s}$ artışı için gerekli yakıt kütlesi, m_y , görevde Ay transfer yörüngesine iletilen küp uydu kütlesi $m_i = 5,00 \text{ kg}$ olarak kabul edildiğinde,

$$m_y = m_i \left(e^{\Delta v/v_c} - 1 \right), \quad (4)$$

ifadesinden $m_y = 0,879 \text{ kg}$ olarak bulunur. Bu hesaplamada yakıtın çıkış hızı v_c için elektrik itki sistemlerinde tipik özgül itki değeri olan $I_{sp} = 2000 \text{ s}$ [Goebel ve Katz, 2008] değerine karşılık gelen $v_c = 19,6 \text{ km/s}$ değeri kullanılmıştır. Bu değer, bir birim küp uydunun kütlelerinin $1,3 \text{ kg}$ olduğu göz önüne alındığında ölçek olarak uygun bir değerdir. Öte yandan, halihazırdaki küp uydu itki sistemleri için itki kuvveti mertebesi $T = 500 \mu\text{N}$ ölçeğindedir. Bu itki kuvveti değeri ile birlikte kütle debisi

$$T = \dot{m}_c v_c, \quad (5)$$

ifadesinden $\dot{m}_c = 2,55 \times 10^{-8} \text{ kg/s}$ olarak hesaplanır. Bu kütle debisi ile $m_y = 0,88 \text{ kg}$ yakıtın kullanılması için gerekli zaman

$$m_y/\dot{m}_c = 3,45 \times 10^7 \text{ s} = 399 \text{ gün}, \quad (6)$$

olarak bulunur. Halihazırdaki küp uydu elektrik itki sistemleri ile 400 günde sağlanabilen bu Δv artışının 10 gün mertebesinde sağlanabilmesi için $T = 20 \text{ mN}$ ölçeğinde 40 kat daha yüksek itme kuvvetine sahip küp uydu elektrik itki sistemlerine ihtiyaç vardır. Görev olurluluğu açısından Δv artışının elektrik itki sistemi ile 10 gün mertebesinde verilmesi daha uygun bir yaklaşım olacağından

yörünge analizinde elektrik itki sisteminin sağladığı itki kuvvetinin ve özgül itki değerinin sırasıyla $T = 20 \text{ mN}$ ve $I_{sp} = 2000 \text{ s}$ değerlerine sahip olduğu kabul edilecektir. Eğer bu değerleri sağlayan bir elektrik itki sistemine erişim mümkün olmazsa görevin gerekli Δv artışının fırlatıcı sisteminin son kademesinin sağlayacağı şekilde tasarlanması daha uygun olacaktır.

YÖNTEM

Bu bölümde ilk olarak elektrik itki sistemine sahip bir küp uydunun hedeflenen yörüngeye erişebilmesi için gerekli olan itki süresi ve yakıt miktarı, itkinin hız vektörü yönünde uygulandığı düşünülüp, incelenecektir. Ardından düşük enerjili yörünge transferinden bahsedilecek ve elektrik itki kullanımı ile ADY'den düşük enerjili yörünge transferine erişim tartışılacaktır. Son olarak da minimum yakıtı bulmak amacıyla uygulanan parçacık sürü optimizasyonundan bahsedilecektir.

İtkinin Hız Vektörü Yönünde Uygulanması

Bir küp uydunun Dünya'nın merkezine göre bağıl konum vektörünün hareket denklemi itki kuvveti varlığında

$$\ddot{\vec{r}} = -\frac{\mu_E}{r^3} \vec{r} + \frac{\vec{T}}{m}, \quad (7)$$

şeklinde yazılır. Burada $\vec{T}$ itki vektörü ve m de uydunun toplam kütesidir. İtkinin, hız vektörü yönünde uygulanacağını düşünürsek $\vec{T} = T \frac{\vec{v}}{v}$ olur. Dolayısıyla (7)

$$\ddot{\vec{r}} = -\frac{\mu_E}{r^3} \vec{r} + \frac{T}{m} \frac{\vec{v}}{v}, \quad (8)$$

şeklinde yazılır. (8) ifadesini $\vec{v}$ ile iç çarpım yaparak

$$\ddot{\vec{r}} \cdot \vec{v} = -\frac{\mu_E}{r^3} \vec{r} \cdot \vec{v} + \frac{T}{m} \frac{\vec{v} \cdot \vec{v}}{v}, \quad (9)$$

ifadesine ulaşılır. Burada $\ddot{\vec{r}} \cdot \vec{v} = \frac{1}{2} \frac{d(\vec{v} \cdot \vec{v})}{dt}$ ve $\frac{\mu_E}{r^3} \vec{r} \cdot \vec{v} = -\frac{d\left(\frac{\mu_E}{r}\right)}{dt}$. Böylece (9)

$$\frac{d\left(\frac{v^2}{2} - \frac{\mu_E}{r}\right)}{dt} = \frac{T}{m} v, \quad (10)$$

formuna dönüştürülür. Küp uydunun yörünge hızı, uygulanan itki süresi boyunca uydunun dairesel spiraller çizdiği varsayılarak $v = \sqrt{\frac{\mu_E}{r}}$ alınır. (10) ifadesi daha düzgün bir hale getirilerek

$$\frac{d(\mu_E/r)}{\sqrt{\mu_E/r}} = -2 \frac{T}{m} dt, \quad (11)$$

ifadesi elde edilir. Ayrıca toplam kütle $m = m_0 - \dot{m}_\zeta t$ de zamana bağlı olarak değişmektedir. Burada $m_0 = (m_i + m_y)$, yani uydunun $t = 0$ anında itki uygulamadan önceki toplam kütesidir. Bunu da göz önünde bulundurarak (11)

$$\frac{d(\mu_E/r)}{\sqrt{\mu_E/r}} = -2 \frac{T}{m_0 - \dot{m}_\zeta t} dt, \quad (12)$$

şeklinde yazılır. Her iki tarafın integrali alınarak

$$\sqrt{\frac{\mu_E}{r}} - \sqrt{\frac{\mu_E}{r_0}} = \frac{T}{\dot{m}_\zeta} \ln \left(1 - \frac{\dot{m}_\zeta t}{m_0} \right), \quad (13)$$

ifadesine ulaşılır. Burada r_0 , $t = 0$ anında uydunun bulunduğu yörüngenin yarıçap uzunluğunu temsil eder. Son olarak $\dot{m}_\zeta = \frac{T}{v_\zeta}$ göz önünde bulundurularak (13) ifadesi t için çözülür:

$$t = \frac{m_0 v_\zeta}{T} \left[1 - e^{\frac{1}{v_\zeta} \left(\sqrt{\frac{\mu_E}{r}} - \sqrt{\frac{\mu_E}{r_0}} \right)} \right]. \quad (14)$$

Uydunun, kütleçekim kuvveti ve itki kuvveti etkisinde hedeflenen yörünge yarıçap uzunluğuna erişmesi için uygulaması gereken itki süresi (14) ile hesaplanır. Gerekli olan yakıt miktarı da $t = m_y / \dot{m}_\zeta$ 'den iletilen uydu kütlesi m_i 'ye bağlı olarak

$$m_y = m_i \left[e^{-\frac{1}{v_\zeta} \left(\sqrt{\frac{\mu_E}{r}} - \sqrt{\frac{\mu_E}{r_0}} \right)} - 1 \right], \quad (15)$$

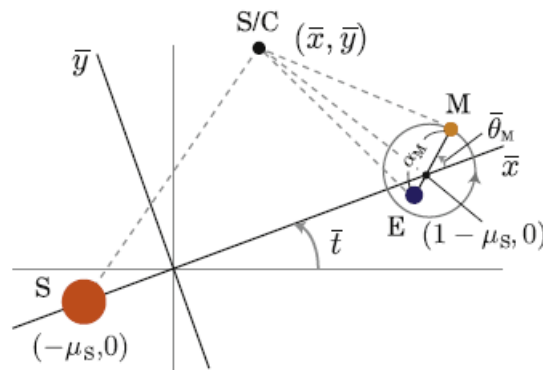
şeklinde hesaplanır.

Giriş bölümünde yapılan hesaplamalar, itkinin anlık darbeleri bir şekilde uygulandığı düşünülüp, etki eden kuvvetin sadece itki kuvveti olduğu göz önüne alınarak yapılmıştır. Bu hesaplamayı yapmaktaki amaç merteye bazında bir fikir edinebilmektir. Fakat elektrik itki uzun süreli uygulandığı için etki eden kuvvetler hem itki hem de kütleçekimdir, dolayısıyla bu bölümdeki hesaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu bölümde [Curtis, 2013] referansının, 6.10'uncu bölümü takip edilmiştir.

Düşük Enerjili Yörünge Transferi

Düşük enerjili yörünge transferinin tasarımıyla ilgili çok fazla çalışma yapılmış olmakla birlikte [Belbruno ve Miller, 1993], [Koon ve diğerleri, 2001], [Onozaki ve diğerleri, 2017], bu çalışmada asıl ilgilenilen kısım düşük enerjili yörünge transferinin tasarımından ziyade böyle bir transfer yörüngesine ADY'den elektrik itki kullanımı ile nasıl erişileceği olduğu için bu çalışmada halihazırda tasarlanmış bir düşük enerjili yörünge transferi kullanılmıştır [Onozaki ve diğerleri, 2017]. Belirtilen referansın seçilme nedeni ise tasarım için gerekli olan başlangıç koşullarını içermesidir. Bu çalışmada kullanılan düşük enerjili yörünge transferi, bu başlangıç koşulları referans alınarak, ilerletilip elde edilmiştir. İlerletme iki-dairesel kısıtlı dört cisim problemi (Bicircular Restricted Four Body Problem) çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Problemin daha iyi anlaşılması için Şekil 1'e bakılabilir.



Şekil 1: İki-dairesel kısıtlı dört cisim problemi [Onozaki ve diğerleri, 2017]

Problemde bulunan dört cisim: Güneş, Dünya, Ay ve uydudur. Bu dört cismin aynı düzlemde olduğu varsayılmıştır. Dünya ve Ay, Dünya-Ay sisteminin kütle merkezi etrafında daireli yörüngede hareket etmektedir. Dünya-Ay sisteminin kütle merkezi de Güneş-Dünya-Ay sisteminin kütle merkezi etrafında daireli yörüngede hareket etmektedir. Şekil 1'deki koordinat sisteminin $\bar{x}$

ekseni Dünya-Ay sisteminin kütle merkezi ile Güneş'i birleştirecek şekilde çizilmiştir. Dünya-Ay sisteminin kütle merkezi ve Güneş, Güneş-Dünya-Ay sisteminin kütle merkezi etrafında dairesel yörüngede hareket ettiklerinden dolayı da bu koordinat sistemi durağan olmayan, dönen bir referans sistemidir. Uydunun bu referans sisteminde, birimsiz (nondimensional) formdaki hareket denklemi [Onozaki ve diğerleri, 2017]'den

$$\ddot{\vec{r}} = 2\bar{\omega}\dot{\vec{r}} + \vec{r} - \frac{(1 - \mu_S)}{\|\vec{r} - \vec{r}_S\|^3} (\vec{r} - \vec{r}_S) - \frac{\mu_S(1 - \mu_M)}{\|\vec{r} - \vec{r}_E\|^3} (\vec{r} - \vec{r}_E) - \frac{\mu_S\mu_M}{\|\vec{r} - \vec{r}_M\|^3} (\vec{r} - \vec{r}_M), \quad (16)$$

şeklinde yazılır. Burada $\bar{\omega}$

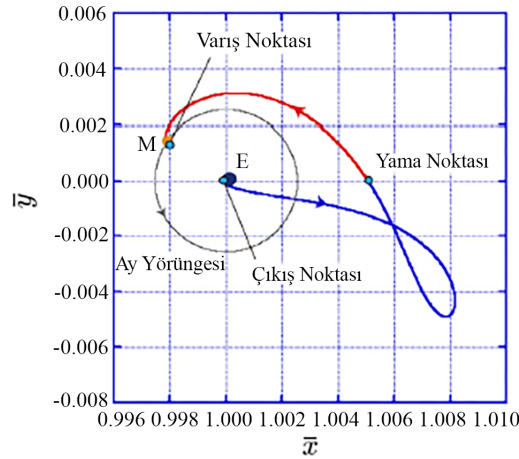
$$\bar{\omega} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (16)'da $\mu_S = (m_E + m_M) / (m_S + m_E + m_M)$ ve $\mu_M = m_M / (m_E + m_M)$. m_S , m_E , m_M sırasıyla Güneş'in, Dünya'nın ve Ay'ın kütleleridir. $\vec{r}$, $\vec{r}_S$, $\vec{r}_E$ ve $\vec{r}_M$ sırasıyla uydunun, Güneş'in, Dünya'nın ve Ay'ın Şekil 1'deki referans sisteminde tanımlanmış birimsiz pozisyon vektörleridir. Birimsiz sistemdeki uzunluk ve zaman, $\bar{d}$ ve $\bar{t}$, birimli sistemdeki uzunluk ve zaman, d ve t olarak ifade edilirse aralarındaki ilişki [Koon ve diğerleri, 2011]'den

$$d = a_S \bar{d}, \quad (18a)$$

$$t = \frac{\bar{t}}{\omega_S}, \quad (18b)$$

şeklinde verilir. Burada a_S , Güneş ile Dünya-Ay sisteminin kütle merkezi arasındaki uzaklığı, ω_S ise Güneş'in, Güneş-Dünya-Ay sisteminin kütle merkezi etrafındaki açısal hızını ifade eder. Denklem (16), ikinci dereceden lineer olmayan sıradan bir diferansiyel denklemdir ve nümerik integrasyon yöntemleri kullanılarak girilen bir başlangıç durumuna göre çözülebilir. Bu çalışmada [Curtis, 2013]'deki Runge-Kutta-Fehlberg çözücüsü kullanılmıştır.



Şekil 2: Bu çalışmada referans alınan düşük enerjili yörünge transferi [Onozaki ve diğerleri, 2017]

	$\bar{x}_Y$	$\bar{y}_Y$	$\dot{\bar{x}}_Y$	$\dot{\bar{y}}_Y$	$\bar{\theta}_M$ (rad)
Mavi Yörünge	1,00507	0	-0,0113680	0,0175449	4,96074
Kırmızı Yörünge	1,00507	0	-0,0121205	0,0184927	4,96074

Tablo 1: Referans alınan düşük enerjili yörünge transferinde, yama noktasına ait birimsiz formdaki başlangıç durumları [Onozaki ve diğerleri, 2017]

Düşük enerjili yörünge transferinde temelde üç noktada manevra yapılmaktadır. İlk manevra Dünya'dan ayrılıp transfer yörüngesine yerleşebilmek için gereklidir. İkinci manevra Güneş-Dünya-Uydu üç cisim sisteminden Ay-Dünya-Uydu üç cisim sistemine geçmek için yapılır. Geçişin yapıldığı bu nokta yama noktası olarak da adlandırılır. Şekil 2'de bu yama noktası görülmektedir. Son manevra da varış noktasında, Ay görev yörüngesine girmek için yapılır.

Transfer	ΔV_E	ΔV_M	ΔV_P	ΔV_T	T
Hohmann	3.141	0.838	–	3.979	5
Belbruno and Miller, 1993	3.161	0.648	0.029	3.838	160
Onozaki et.al., 2017	3.202	0.642	0.036	3.880	100

Şekil 3: Transfer yöntemlerinin karşılaştırılması, ΔV [km/s] ve transfer süresi T [gün] [Onozaki ve diğerleri, 2017]

Şekil 3'de Hohmann transferi ve iki farklı düşük enerjili yörünge transferi karşılaştırılmıştır. İkinci satırdaki [Belbruno ve Miller, 1993]'e, üçüncü satırdaki [Onozaki ve diğerleri, 2017]'ye ait farklı transfer sürelerine sahip düşük enerjili yörünge transferleridir. Şekil 3'den de görüleceği üzere dünyadan kaçış için gerekli olan ΔV_E üç transferde de aynı mertebededir. ΔV_P , düşük enerjili yörünge transferinde yama noktasındaki manevrayı temsil etmektedir. Son olarak ΔV_M , Ay görev yörüngesine giriş için gerekli olan manevradır.

Bu çalışmada [Onozaki ve diğerleri, 2017]'deki düşük enerjili yörünge transferi referans alınmıştır. Yama noktasına ait başlangıç koşulları denklem (16)'nın kullanılmasıyla nümerik olarak ileri doğru ilerletilerek Ay görev yörüngesine, geriye doğru ilerletilerek de Dünya'ya ulaşılmıştır. Böylece Dünya'dan Ay'a düşük enerjili yörünge transferi elde edilmiştir. [Onozaki ve diğerleri, 2017]'de ADY'den düşük enerjili yörünge transferine kimyasal itki, yani anlık darbeli itki kullanılarak erişilmiştir. Bu çalışmada ise elektrik itki kullanılarak nasıl erişileceği incelenecektir.

ADY'den Düşük Enerjili Yörünge Transferine Erişim

Bu bölümde ADY'den düşük enerjili yörünge transferine, elektrik itki kullanımı ile nasıl erişileceği incelenecektir. Öncelikle ADY'den elektrik itki kullanımı ile düşük enerjili yörünge transferi üzerindeki uygun bir noktaya erişilecektir. Bu noktada transfer yörüngesinde sahip olunması gereken hız, elektrik itki kullanımı ile erişilen hızdan farklı olduğundan bu noktada anlık kimyasal itkinin kullanıldığı varsayılacaktır.

İlk olarak erişilmek istenen düşük enerjili yörünge transferi, yama noktasındaki başlangıç durumu kullanılarak geriye doğru ilerletilmiştir. Geriye ilerletme boyunca her noktada uydunun pozisyon ve hız vektörleri elde edilmiştir. Daha sonra uydunun Dünya ile mesafesi hesaplanmış ve uzaklığı 384.400 km'den küçük olan noktalar alınmıştır. Böyle bir kısıtlama yapmaktaki temel amaç düşük enerjili yörünge transferine girilecek uygun noktaları belirlemektir. Uzaklığı 384.400 km'den büyük olan noktalara elektrik itki kullanımı ile gidip düşük enerjili yörünge transferine girmek, elektrik itki kullanımı ile spiral çizerek doğruca Ay yörüngesine girmekten daha uzun süreli elektrik itki kullanımını gerektirmektedir. Uzun süreli elektrik itki kullanımı, transfer süresini arttırmakla birlikte, mevcut küp uydu elektrik itki sistemlerinin teknik yeterlilikleri bakımından uygulanabilir olmayabilir.

Transfer yörüngesine girilecek uygun noktalar belirlendikten sonra elektrik itkinin hız vektörü yönünde uygulandığı durumda ADY'den istenilen noktaya erişmek için gerekli olan süre miktarı denklem (14)'den ve yakıt miktarı da denklem (15)'den hesaplanabilir. Daha önce de bahsedildiği gibi transfer yörüngesinde sahip olunması gereken hız, elektrik itki kullanımı ile erişilen hızdan farklı olduğundan bu noktada kimyasal itki ile anlık bir Δv_K 'nin uygulandığı düşünülmüştür. Bu

Δv_K 'nin büyüklüğü basitçe

$$\Delta v_K = \sqrt{v_T^2 + v_E^2 - 2v_T v_E \cos \gamma}, \quad (19)$$

şeklinde hesaplanır. Burada v_T , istenilen noktada düşük enerjili yörünge transferine girmek için sahip olunması gereken hızdır, v_E ise elektrik itki uygulayarak istenilen noktaya gelindiğinde sahip olunan hızdır. Elektrik itkinin hız vektörü yönünde uygulandığı durumda, uydunun dairesel spiraller çizdiği varsayılmıştır. Dolayısıyla uydunun elektrik itki kullandığı kısımda, herhangi bir zamandaki hızı, uydunun bulunduğu spiralin yarıçapına eşit dairesel yörünge hızına eşittir. γ da $\vec{v}_T$ ile $\vec{v}_E$ arasındaki açıdır. Bu Δv_K 'yi kimyasal itki ile uygulamak için gerekli olan yakıt miktarı da denklem (4)'den hesaplanabilir. Böylece ADY'den düşük enerjili yörünge transferine erişmek için gerekli olan toplam yakıt miktarı, elektrik itki ile transfer yörüngesi üzerindeki bir noktaya erişmek için gerekli olan yakıtın ve bu noktada hız değerlerini örtüştürmek için gerekli olan kimyasal itkiden gelen yakıtın toplamıdır.

Bu çalışmada ADY'den düşük enerjili yörünge transferine erişmek için gerekli olan yakıt miktarı, transfer yörüngesine girilecek uygun noktaların hepsinde hesaplanmıştır. ADY'den düşük enerjili yörünge transferine girilecek en uygun nokta, parçacık sürü optimizasyonu kullanımı ile minimum yakıtın elde edildiği nokta olarak belirlenmiştir.

Parçacık Sürü Optimizasyonu

Düşük enerjili yörünge transferini gerçekleştirmek için gerekli olan yakıt miktarını verimli bir şekilde hesaplayabilmek için parçacık sürü optimizasyonu (PSO) kullanılmıştır. Bunun için düşük enerjili yörünge transferinde, yama noktasından geriye doğru ilerletme yapılmış ve daha önce bahsedilen gerekli manevraların ihtiyaç duyduğu yakıt miktarı hesaplanarak toplam yakıt miktarının asgari seviyeye indirilmesi hedeflenmiştir. Bu manevraların toplam yakıt miktarını minimize etmeye çalışan PSO, yama noktasındaki hız vektörünü ve toplam geriletme süresini değişken olarak almaktadır. Yapılan geriletme işlemi süresince düşük enerjili yörünge transferine girilecek nokta, geriletme süresince hesaplanan tüm noktalarda ihtiyaç duyulan yakıtı bakılarak ihtiyacın en az olduğu nokta olarak seçilmiştir.

Algoritma 1 PSO Algoritması

```

1: for i=1'den sürü boyutu kadar do
2:   Belirlenen sınırlar içerisinde parçacığı rastgele tanımla
3:   Parçacığın maliyetini belirle
4: end for
5: Sürünün en iyisi,  $\vec{P}_{best}$ , ve evrensel en iyiyi,  $\vec{G}_{best}$ , tanımla
6: for j=1'den azami iterasyon sayısı do
7:   for i=1'den sürü boyutu kadar do
8:      $\vec{v}_{ij} = \omega \vec{v}_{ij} + c_1 \vec{r}_1 [\vec{P}_{best} - \vec{x}_{ij}] + c_2 \vec{r}_2 [\vec{G}_{best} - \vec{x}_{ij}]$ 
9:      $\vec{x}_{ij} = \vec{x}_{ij} + \vec{v}_{ij}$ 
10:   end for
11:   Sonuçlara göre  $\vec{P}_{best}$  ve  $\vec{G}_{best}$ 'i güncelle
12:   Eğer durma kriteri belirlenmişse kontrol et, koşul sağlanmışsa iterasyonu bitir
13:    $\omega = \omega * \omega_{damp}$ 
14: end for

```

PSO, parçacık, $\vec{x}$, denilen ve içerisinde yukarıda bahsedilen üç değişkeni barındıran durumun, bir sürü oluşturacak kadar fazla sayıda oluşturulup bu sürünün evrensel en iyi sonuca gidene kadar iterasyona alınmasından oluşmaktadır. Sürüdeki her bir parçacığın değeri hız vektörü denilen, $\vec{v}$, ve değişim miktarını belirleyen vektörle iterasyonlar boyunca güncellenir. Bu hız vektörü, bir önceki iterasyonda kullanılan hız vektörü, mevcut parçacığın sürüdeki ve o zamana kadar bulunan en iyi

sonuca olan mesafesiyle belirli katsayılarla çarpılmasıyla hesaplanır. Algoritma-1'de görülebilen ω , c_1 , c_2 ve $\vec{r}$ katsayılarından ω , c_1 , c_2 iterasyonlar başlamadan tanımlanır. $\vec{r}$ vektörünün bileşenleri ise 0 ve 1 arasından seçilmiş rastgele sayılardır. Durgunluk katsayısı olarak bilinen ω , sürünün ne kadar hızlı yakınsayacağını belirler. Büyük bir değer sürünün keşif potansiyelini arttırsa da sürünün bir noktaya yakınsaması için ihtiyaç duyulan iterasyon sayısını da arttırır. Bu yüzden her tur ω_{damp} ile çarpılarak küçülmesi ve sürünün yakınsama hızının artırılması sağlanır. c_1 ve c_2 ise sabit olmalarına rağmen sürünün yerel ya da evrensel en iyiye doğru hareketini belirlemede etkilidir. Kullanılan tüm sabit katsayılar [Yarpiz, 2016]'da belirtilen ve genel kabul gören sayılar olarak belirlenmiştir.

UYGULAMALAR

Bu bölümde ilk olarak, ADY'den düşük enerjili yörünge transferini gerçekleştirmek için gerekli olan yakıt ve süre hesaplamalarına yer verilmiştir. Daha sonra, küp uydunun ADY'den spiral çizerek Ay'a eriştiği durumda yakıt ve süre miktarları incelenmiştir. Son olarak da iki farklı transfer yörüngesinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Düşük Enerjili Yörünge Transferi

Küp uydunun, düşük enerjili yörünge transferini kullanarak Ay'a eriştiği durumda ilk olarak Ay görev yörüngesine girmek için gerekli olan yakıt miktarı hesaplanmıştır. Ardından sırasıyla, yama noktasındaki manevra için gerekli yakıt miktarı ve düşük enerjili yörünge transferine girmek için gerekli olan yakıt miktarı hesaplanmıştır. Analize son noktadaki yakıt hesaplamasından başlayıp geriye doğru ilerlemekteki temel neden, sonraki manevralardan elde edilen yakıtın daha önceki manevraların yakıt hesaplamasında kullanılan iletilen küp uydu kütlesine eklenmesidir. Son olarak da PSO kullanımıyla yakıt minimizasyonu yapılmıştır. Bu çalışmada ilgilenilen kısım, ADY'den düşük enerjili yörünge transferine erişim olduğu için Ay görev yörüngesine girmek için yapılan manevranın ve yama noktasındaki manevranın kimyasal itki ile yapıldığı varsayılmıştır, bu iki noktadaki manevranın elektrik itki ile yapılması ayrı bir inceleme konusudur.

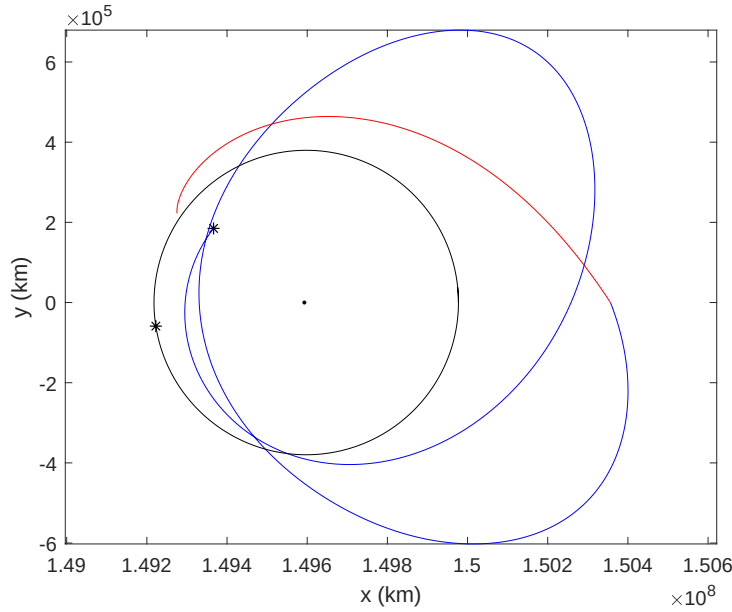
Düşük enerjili yörünge transferi sonunda Ay görev yörüngesine girmek için gerekli olan Δv_M , [Onozaki ve diğerleri, 2017]'da verilmiştir ve değeri $\Delta v_M = 0,642 \text{ km/s}$ 'dir. Bu manevranın $I_{sp} = 300 \text{ s}$ değerine sahip bir kimyasal itki sistemi ile yapıldığı düşünülürse ve iletilen uydu kütlesi $m_i = 5,00 \text{ kg}$ alınırsa, gerekli yakıt miktarı (4)'den $m_A = 1,2 \text{ kg}$ olarak hesaplanır. Yama noktasındaki manevra için gerekli yakıt ve düşük enerjili yörünge transferine girmek için gerekli yakıt PSO kullanımıyla elde edilmiştir.

PSO, başlangıç durumu için girilen maksimum ve minimum değer aralığı referans alınan makaledeki başlangıç durumunun maksimum iki katı minimum yarısı olarak belirlenip, 200 iterasyon sayısı ile yaklaşık 70 defa çalıştırılmıştır. Elde edilen yakıt değerleri, iki anlamlı hane mertebesinde aynı değere yakınsamıştır. Yakınsayan sonuçlardan minimum süreye sahip olan durum, bu çalışmada sunulmak üzere seçilmiştir.

	$\bar{x}_Y$	$\bar{y}_Y$	$\dot{\bar{x}}_Y$	$\dot{\bar{y}}_Y$	$\bar{\theta}_M \text{ (rad)}$
Mavi Yörünge	1,00507	0	-0,0060967	0,0154186	4,96074
Kırmızı Yörünge	1,00507	0	-0,0121205	0,0184927	4,96074

Tablo 2: PSO'dan elde edilen düşük enerjili yörünge transferinde, yama noktasına ait birimsiz formdaki başlangıç durumları

Bu çalışmada sunulmak üzere seçilen sonuç Şekil (4)'de verilmiştir. Mavi yörünge üzerindeki yıldızlı nokta, düşük enerjili yörünge transferine girilecek noktayı göstermektedir. Uydu, ADY'den bu noktaya elektrik itki ile ulaşacaktır. Siyah yörünge, Ay'ın Dünya etrafındaki yörüngesidir ve bu yörünge üzerindeki yıldızlı nokta, uydunun transfer yörüngesine girdiği andaki Ay'ın konumudur.

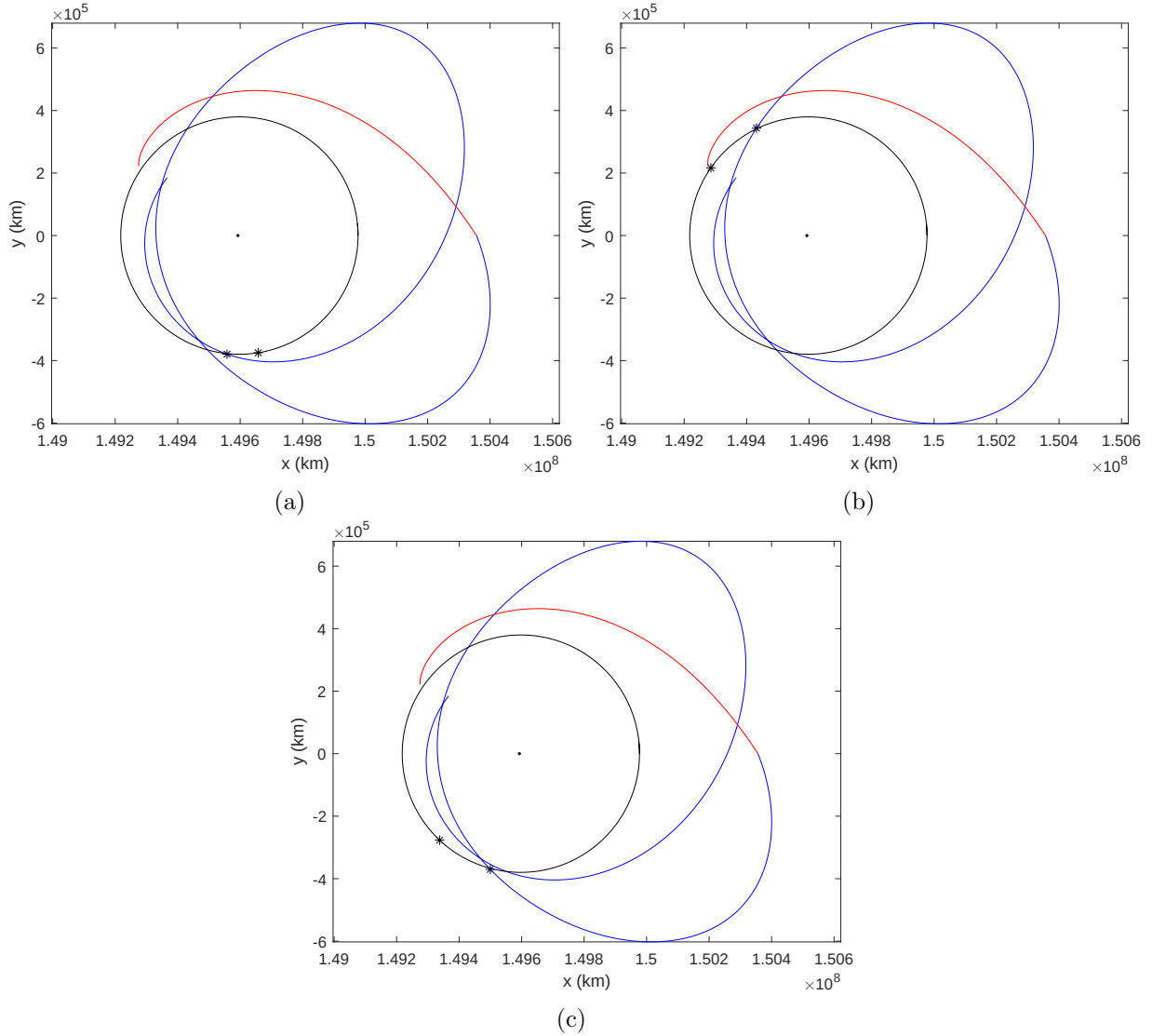


Şekil 4: PSO'dan elde edilen düşük enerjili yörünge transferi

Elde edilen bu sonuçta, yama noktasındaki manevranın büyüklüğü $\Delta v_P = 0,202 \text{ km/s}$ olarak bulunmuştur. Bu manevranın $I_{sp} = 300 \text{ s}$ değerine sahip bir kimyasal itki sistemi ile yapıldığı düşünülürse ve iletilen uydu kütlesi, Ay görev yörüngesine girmek için gerekli olan manevrada ihtiyaç duyulan yakıt kütlesinin ve küp uydunun görev yükü kütlesinin toplamı olan $m_i = 6,2 \text{ kg}$ alınırsa, gerekli yakıt miktarı (4)'den $m_Y = 0,4 \text{ kg}$ olarak hesaplanır.

ADY'den düşük enerjili yörünge transferine girmek için gerekli olan yakıt miktarı, transfer yörüngesine girilecek noktaya kadar uygulanan elektrik itki için gerekli yakıtın ve bu noktaya eriştikten sonra hız değerlerini örtüştürmek için yapılan manevra için gerekli yakıtın toplamıdır. Öncelikle hız değerlerini örtüştürmek için gerekli olan manevra incelenmiştir. Bunun nedeni buradan elde edilen yakıtın, elektrik itkinin yakıt hesaplaması kısmında kullanılan iletilen küp uydu kütlesine eklenmesidir. Şekil (4)'de mavi yörünge üzerindeki yıldızlı nokta, düşük enerjili yörünge transferine girilecek noktayı göstermektedir. ADY'den elektrik itki kullanımı ile bu noktaya eriştikten sonra küp uydunun bu noktadaki hızı v_E , bulunduğu yarıçapa ait dairesel yörünge hızına eşittir. Düşük enerjili yörünge transferine girilecek noktada olunması gereken hız değeri v_T de, PSO sonucunda bulunan yama noktasına ait başlangıç durumu geriye doğru ilerletilerek elde edilmiştir. PSO'dan elde edilen sonuçta, $\vec{v}_E$ ve $\vec{v}_T$ aynı yönde olup, büyüklük bakımından örtüşmektedir. Dolayısıyla, bu noktada hız değerlerini örtüştürmek için bir manevraya gereksinim duyulmamaktadır. Fakat buna dayanarak küp uydunun, düşük enerjili yörünge transferine girdikten sonra dairesel bir yörüngede hareket etmesi beklenirken, eliptik bir yörüngeye nasıl geçtiği irdelenmesi gereken bir sorudur. Bu soruyu cevaplamak için öncelikle Ay'ın küp uydunun hareketi üzerindeki etkisi ve hareket boyunca aralarındaki uzaklık incelenmiştir. Küp uydu, düşük enerjili yörünge transferine girdikten sonra Ay yörüngesini ilk kestiği noktaya kadar Ay ile arasındaki mesafe sürekli azalmaktadır ve uydunun Ay yörüngesini kestiği ilk noktada mesafe minimum olmuştur. Bu noktada uydunun ve Ay'ın pozisyonları Şekil (5a)'da verilmiştir. Burada uydu, Ay ile yakın geçiş yapmakta ve yörünge enerjisini arttırmaktadır. Dairesel yörüngeden eliptik yörüngeye bu enerji artışı sebebiyle geçtiği öngörülmektedir. Ayrıca transfer süresi boyunca uydunun, Ay yörüngesini kestiği ikinci ve üçüncü noktada, uydunun ve Ay'ın pozisyonları Şekil (5b)'de ve Şekil (5c)'de verilmiştir. Transfer yörüngesine giriş noktasında ve yama noktasında, Güneş-Dünya-uydu üç cisim sisteminin Jacobi sabiti hesaplandığında bu iki noktadaki değerler dört anlamlı haneden sonra farklı olduğu gözlenmekte ve bu farkın Ay'ın yaratmış olduğu pertürbatif etkiden kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Bu önermeyi doğrulamak için halen analizlere devam edilmektedir.

Küp uydunun, elektrik itki uygulayarak ADY'den düşük enerjili yörünge transferine erişmesi için gerekli olan yakıt miktarı, iletilen küp uydu kütlesi Ay görev yörüngesine girmek için gerekli olan manevrada ihtiyaç duyulan yakıt kütlesinin, yama noktasındaki manevrada ihtiyaç duyulan yakıt kütlesinin ve küp uydunun görev yükü kütlesinin toplamı olan $m_i = 6,6$ kg alınırsa, itki sisteminin yakıt çıkış hızı $v_c = 19,6$ km/s olarak düşünülürse, küp uyduyu 200 km irtifadan ($r_0 = 6578$ km), düşük enerjili yörünge transferine girilecek noktaya ($r = 299.153$ km) eriştirebilmek için gerekli olan yakıt miktarı (15)'ten $m_E = 2,7$ kg olarak hesaplanır. Ardından, elektrik itki sisteminin uyguladığı kuvvet $T = 20$ mN ve başlangıçtaki toplam kütle de, toplam yakıtın ve küp uydunun görev yükü kütlesinin toplamı olan $m_0 = 9,3$ kg olduğundan, ihtiyaç duyulan itki süresi de (14)'ten 30 gün olarak hesaplanır.



Şekil 5: Uydunun, transfer yörüngesine girdikten sonra Ay yörüngesini ilk kestiği noktada uydu ile Ay'ın konumu Şekil (5a)'da, ikinci kestiği noktada uydu ile Ay'ın konumu Şekil (5b)'de, üçüncü kestiği noktada uydu ile Ay'ın konumu Şekil (5c)'de gösterilmiştir

Sonuç olarak, faydalı görev yükünün kütlesi 5,00 kg olan bir küp uyduyu, ADY'den düşük enerjili yörünge transferine yerleştirebilmek için gerekli olan yakıt miktarı $m_E = 2,7$ kg, yama noktasındaki manevrada ihtiyaç duyulan yakıt miktarı $m_Y = 0,4$ kg, Ay görev yörüngesine girmek için gerekli olan manevrada ihtiyaç duyulan yakıt miktarı $m_A = 1,2$ kg olarak bulunmuştur. Dolayısıyla toplamda $m_T = 4,3$ kg'lık yakıta ihtiyaç duyulmaktadır. Toplam transfer süresi de, elektrik itkinin

uygulanma süresi olan 30 günün, yama noktasına erişim için gerekli olan 96 günün ve yama noktasından Ay görev yörüngesine erişim için gerekli olan 18 günün toplamı olarak 144 gün bulunmuştur.

Spiral Transfer

Küp uydunun ADY'den spiral çizerek Ay'a eriştiği durumda ilk olarak Ay görev yörüngesine girmek için gerekli olan yakıt miktarı hesaplanmıştır. Analize bu son noktadaki yakıt hesaplaması ile başlanmasındaki temel neden, buradan elde edilen yakıtın ADY'den transfer yörüngesine iletilen küp uydu kütlesine eklenmesi ve elektrik itkinin uygulandığı kısımda yakıtın bu iletilen küp uydu kütlesi üzerinden hesaplanmasıdır.

Küp uydunun Ay yörüngesine ulaştığı zamanki hızı, yarıçapı $r = 384400$ km olan dairesel yörünge hızına eşittir. Bu hız değeri aynı zamanda Ay'ın Dünya etrafındaki yörünge hızına eşit olup, değeri (1)'den $1,018$ km/s olarak hesaplanır. Dolayısıyla küp uydunun, Ay yörüngesine ulaştığı zamanki hızı Ay'a göre sıfırdır ve hedefteki Ay görev yörüngesinde bulunabilmek için küp uydunun Ay'a göre belli bir hıza sahip olması gereklidir. Bu hız değeri hedeflenen görev yörüngesine bağlı olarak değişmekle birlikte, 100 km irtifası olan alçak Ay görev yörüngesi ele alınırsa, küp uydunun Ay'a göre sahip olması gereken hız değeri (1)'den hesaplanabilir. Denklem (1)'de, μ_E yerine μ_M yani Ay-uydu iki cisim sistemi için kütleçekim parametresi $\mu_M = 4903 \text{ km}^3/\text{s}^2$ alınırsa, r yerine de $r = 1837$ km yazılırsa, küp uydunun 100 km'lik irtifadaki Ay görev yörüngesinde sahip olması gereken hız değeri $1,634$ km/s olarak hesaplanır. Dolayısıyla küp uydu, Ay yörüngesine ulaştıktan sonra hedefteki Ay görev yörüngesine girebilmek için $\Delta v = 1,634$ km/s'lik bir manevra yapması gereklidir. Bu manevranın $I_{sp} = 300$ s değerine sahip bir kimyasal itki sistemi ile yapıldığı düşünülürse ve iletilen uydu kütlesi $m_i = 5,00$ kg alınırsa, gerekli yakıt miktarı (4)'den $m_A = 3,7$ kg olarak hesaplanır. Ay görev yörüngesine girmek için gerekli olan manevranın elektrik itki ile yapılması ayrı bir inceleme konusu olmakla birlikte bu çalışmada ADY'den Ay görev yörüngesine erişim yani transfer kısmıyla ilgilenildiği için son noktadaki manevranın kimyasal itki ile yapıldığı varsayılmıştır.

Küp uydunun, ADY'den spiral çizerek Ay yörüngesine eriştiği kısımda, elektrik itkinin hız vektörü yönünde uygulandığı düşünülüp, yöntem bölümünün birinci kısmındaki denklemlerden faydalanılmıştır. Ay transfer yörüngesine iletilen küp uydu kütlesi, Ay görev yörüngesine girmek için gerekli olan manevrada ihtiyaç duyulan $3,7$ kg'ın ve küp uydunun faydalı görev yükünün kütlesi olan $5,00$ kg'ın toplamı yani $m_i = 8,7$ kg olarak kabul edilirse, itki sisteminin yakıt çıkış hızı $v_c = 19,6$ km/s olarak alınırsa, küp uyduyu 200 km irtifadan ($r_0 = 6578$ km), Ay yörüngesine ($r = 384400$ km) yerleştirebilmek için gerekli olan yakıt miktarı (15)'ten $m_E = 3,6$ kg olarak hesaplanır. Ardından, itki sisteminin uyguladığı kuvvet $T = 20$ mN ve başlangıçtaki toplam kütle de $m_0 = (m_i + m_y) = 12,3$ kg olduğundan, ihtiyaç duyulan itki süresi de (14)'ten 41 gün olarak hesaplanır.

Sonuç olarak, faydalı görev yükü kütlesi $5,00$ kg olan bir küp uyduyu, ADY'den spiral çizerek Ay yörüngesine yerleştirebilmek için gerekli olan yakıt miktarı $m_E = 3,6$ kg, Ay yörüngesine eriştikten sonra Ay görev yörüngesine girmek için gerekli olan yakıt miktarı da $m_A = 3,7$ kg olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla toplamda $m_T = 7,3$ kg'lık yakıtı ihtiyaç duyulmaktadır. Transfer süresi de 41 gün olarak hesaplanmıştır.

	m_E (kg)	m_Y (kg)	m_A (kg)	m_T (kg)	T (gün)
Düşük Enerjili Yörünge Transferi	2,7	0,4	1,2	4,3	144
Spiral Transfer	3,6	—	3,7	7,3	41

Tablo 3: Düşük enerjili yörünge transferinin ve spiral transferin, yakıt ve süre bakımından karşılaştırılması

SONUÇ

Bu çalışmada ADY'deki, yüksek özgül itme ile düşük itki kuvvetine sahip bir itki sistemi ile donatılmış bir küp uydunun, düşük enerjili yörünge transferini gerçekleştirmesi için gerekli olan yakıt miktarı PSO yardımıyla elde edilmiş, ilgili yörünge sunulmuştur. PSO sonucunda, faydalı görev yükü kütlesi 5,00 kg olan bir küp uydunun, düşük enerjili yörünge transferini gerçekleştirmesi için gerekli olan toplam yakıt miktarı 4,3 kg ve toplam transfer süresi de 144 gün olarak bulunmuştur. Düşük enerjili yörünge transferinin yanı sıra spiral transfer de incelenmiştir. Faydalı görev yükü kütlesi 5,00 kg olan bir küp uydunun, spiral transferi kullanması durumunda toplam yakıt miktarı 7,3 kg ve toplam transfer süresi de 41 gün olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak, süre kısıtlaması olmayan bir küp uydu Ay görevi için düşük enerjili yörünge transferi, yakıt tasarrufu nedeniyle ideal gözükmektedir.

Kaynaklar

- Belbruno, E. A. ve Miller, J. K. (1993) *Sun-Perturbed Earth-to-Moon Transfers with Ballistic Capture*, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 16, No. 4.
- Curtis, H. D. (2013) *Orbital Mechanics for Engineering Students*, 3. Edition, Elsevier.
- Folta, D. C., Bosanac, N., Cox, A. ve Howell, K. C. (2016) *The Lunar IceCube Mission Design: Construction of Feasible Transfer Trajectories with a Constrained Departure*, 26th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting.
- Goebel, D. M. ve Katz, I. (2008) *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*, JPL Space Science and Technology Series.
- Koon, W. S., Lo, M. W., Marsden, J. E. ve Ross, S. D. (2001) *Low Energy Transfer to the Moon*, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, Vol. 81, pp. 63-73.
- Koon, W. S., Lo, M. W., Marsden, J. E. ve Ross, S. D. (2011) *Çevrim içi: Dynamical Systems, the Three-Body Problem and Space Mission Design*, Erişilebilir: http://www.cds.caltech.edu/marsden/volume/missiondesign/KoLoMaRo_DMissionBk.pdf, Erişim tarihi: 10.08.2020.
- NASA (2019) *Çevrim içi: Artemis I Overview*, Erişilebilir: <https://www.nasa.gov/content/artemis-i-overview>, Erişim tarihi: 16.08.2020.
- NASA (2020) *Çevrim içi: Mars Cube One (MarCO)*, Erişilebilir: <https://www.jpl.nasa.gov/cubesat/missions/marco.php>, Erişim tarihi: 16.08.2020.
- Onozaki, K., Yoshimura, H. ve Ross, S. D. (2017) *Tube dynamics and low energy Earth-Moon transfers in the 4-body system*, Advances in Space Research, Vol. 60, pp. 2117-2132.
- Yarpiz (2016) *Çevrim içi: Particle Swarm Optimization (PSO) in MATLAB-Video Tutorial*, Erişilebilir: yarpiz.com/440/ytea101-particle-swarm-optimization-pso-in-matlab-video-tutorial, Erişim tarihi: 23.01.2020.