

3 BİRİMLİK KÜP UYDULAR İÇİN YÖRÜNGEDEN DÜŞÜRME SİSTEMİ TASARIMI

Ahmet Kerem Karaaslan¹ ve Ceyhun Tola²
Türk Hava Kurumu Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Günümüzde üniversiteler ve araştırma kuruluşları, tasarlayıp ürettikleri uydu alt sistemlerini test etmek amacıyla yere yakın yörüngelere çeşitli boyutlarda küp uydular göndermektedirler. Bu uydular görev sürelerinin tamamlanmasının ardından bulundukları irtifaya bağlı olarak oldukça uzun süre yörüngede çöp olarak kalmaya devam ederek aynı yörüngede aktif olarak görev yapan sistemleri tehdit etmektedirler. Birleşmiş Milletler uyarınca görev süresini tamamlayan uyduların 25 yıl içerisinde bulundukları yörüngeden düşürülmesi ya da çöp yörüngesine gönderilmesi gerekmektedir. Çalışma kapsamında, yere yakın yörüngede görev yapan 3 birimlik küp uydular için yörüngeden düşürme sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu araştırmanın temel amacı, yerli, güvenilir, düşük bütçeli ve mümkün olduğu kadar hafif/az yer kaplayan bir sistem tasarlamaktır. Belirtilen hedefler doğrultusunda tasarım şeması planlanmış ve tasarım, bilgisayar destekli katı modelleme programı (SolidWorks) aracılığı ile oluşturulmuştur. Yörüngeden düşürme sistemi, kontrol mekanizması, yükseltme mekanizması ve açılır yüzeyler olmak üzere 3 ana bölümden oluşmaktadır. Boyutlandırma işleminin ardından, tasarımın 3 birimlik bir küp uyduyu yere yakın yörüngeden aerodinamik sürüklenme kuvvetini kullanarak düşürme süresi, STK (Systems Tool Kit) yazılımı aracılığıyla farklı atmosferik modeller kullanılarak analiz edilmiştir. Bu sayede, tasarlanan sistemin 680 km irtifada görev yapmakta olan 3 birimlik bir küp uyduyu 25 yıldan daha kısa bir süre içerisinde düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır. Tasarlanan sistem kapladığı yer ve ağırlığı bakımından benzer sistemlere göre avantajlıdır.

GİRİŞ

4 Ekim 1957 yılında, ilk yapay uydu olan Sputnik-1 uydusunun uzaya gönderilmesi ile başlamış olan uzay serüveni, uzay yarışını başlatan ilk gelişme olarak tarihe geçmiştir. Bu gelişme, yeni bir rekabet alanı oluşturarak uzay teknolojilerinde atılacak olan adımların öncüsü olmuştur. Günümüzde Dünya yörüngesine, birçok farklı amaç doğrultusunda uydu ve uzay araçları gönderilmektedir. Bunlar, daha çok yere yakın yörüngeye sivil ve askeri amaçlarla gönderilen uydulardır. Fırlatma maliyetlerinden dolayı gelişen teknoloji ile birlikte daha hafif ancak daha yetenekli uydu sistemleri geliştirilmiştir. Yeni uydu alt sistemlerini düşük maliyetle geliştirme ve yörüngede test etme arzusu küp uydu teknolojisinin gelişmesine yol açmıştır. İlk küp uydu 2000'li yılların başında fırlatılmış olup şu ana kadar yörüngeye fırlatılan küp uyduların sayısı 1000'in üzerindedir.

Çok sayıda uydunun yörüngeye gönderilmesi bazı sorunları da ortaya çıkartmıştır. Bu sorunlardan en büyüğü görev süresi dolan uyduların uzayda birer çöp haline gelmesi ve bir uzay enkazı oluşturmasıdır. Yörüngeye gönderilen uydular belirli bir süre sonra işlevlerini tamamlayarak yörüngede çöp durumuna gelirler. Bu uzay çöpleri daha çok yere yakın yörüngede bulunmaktadır. Şekil-1'de yere yakın yörüngede bulunan uydu ve uzay çöpi sayısının yıllar içerisindeki artışı görülmektedir.

¹Lisans Öğrencisi, Uzay Müh. Böl., E-posta: s140122022@stu.thk.edu.tr

²Dr. Öğr. Üyesi, Uzay Müh. Böl., E-posta: ctola@thk.edu.tr



Şekil 1: Dünya yörüngesinde görevi devam eden ve tamamlanan tüm uyduların modeli.

Uydular, yere yakın yörüngede atmosferik sürüklemenin etkisiyle zamanla irtifa kaybetmeye başlarlar. Uydu, yer yüzeyine ne kadar yakınsa yörüngedeki teğetsel hızı ve bulunduğu irtifadaki hava yoğunluğu da o denli fazla olduğu için maruz kaldığı atmosferik sürüklenme miktarı da o derece fazla olacaktır.

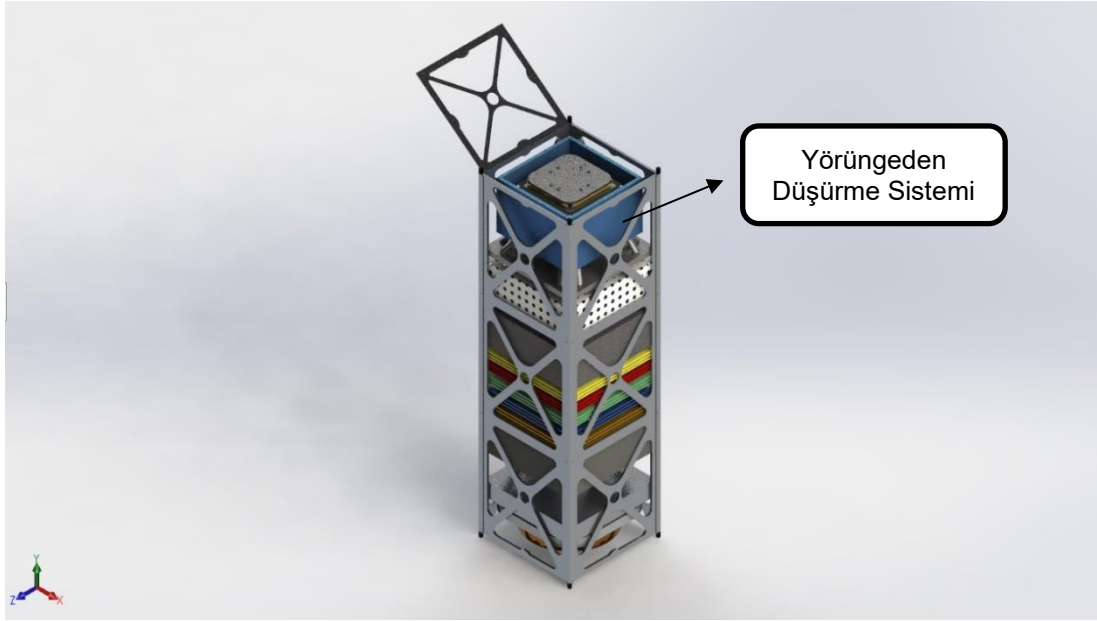
Literatürde geçmişten günümüze kadar yörüngeden düşürme sistemlerinin geliştirilmesi üzerine farklı çalışmalar yürütülmüştür. Maessen, yere yakın uyduları atmosferik sürüklemeyi kullanarak yörüngeden düşürebilmek amacıyla şişerek açılabilen piramit yapıya sahip bir yörüngeden düşürme sistemi tasarlamıştır [Maessen, 2007]. Tola ve beraberindekiler 3 birimlik bir küp uyduyu yere yakın yörüngeden atmosferik sürüklenme yardımıyla düşürebilmek amacıyla yayda depolanan enerjiyi kullanarak iki yana kapton yüzeyler açılmasını sağlayan, düşük maliyetli bir yörüngeden düşürme sistemi tasarlamışlardır [Tola, Aslan, İlarıslan, 2011]. Lappas ve ekibi, 900 km irtifada görev yapan 500 kg'a kadar olan uyduların atmosferik sürüklenme kuvvetiyle 25 yıldan daha kısa sürede düşmesini sağlayan bir yörüngeden düşürme sistemi geliştirmişlerdir [Lappas, Pellegrino, Guenat ve diğerleri, 2011]. Harkness ve beraberindekiler, hazırlamış oldukları uluslararası bildiride, AEOLDOS isimindeki yörüngeden düşürme sisteminin açılması sırasındaki dinamiği analiz ederek bu tür sistemlerin geliştirilmesi sırasında karşılaşılan zorlukları anlatmışlardır [Harkness, McRobb, ve Milligan, 2014]. Blanco yüksek lisans çalışması kapsamında farklı türde yere yakın uydularda kullanılabilecek, atmosferik sürüklenme ile uyduları yörüngeden düşürmeyi hedefleyen güvenilir bir yörüngeden düşürme sistemi tasarlamış ve test etmiştir [Blanco, 2017]. Guglielmo ve beraberindekiler, 15 kg ağırlığa sahip 700 km irtifada görev yapan 12 birimlik bir küp uyduyu 25 yıldan daha kısa sürede atmosferik sürüklemeyi kullanarak yörüngeden düşürme yeteneğine sahip aynı zamanda bu sürüklenme kuvvetini kullanarak uyduya manevra yaptırabilme kabiliyeti olan bir sistem tasarlamışlardır [Guglielma, Omar, Bevilacqua ve diğerleri, 2018].

Çalışma kapsamında, 680 km irtifada görev yapan 3 birimlik bir küp uyduyu 25 yıldan daha kısa sürede aerodinamik sürüklemeyi kullanarak düşürebilecek mümkün olduğunca hafif ve az yer kaplayan bir yörüngeden düşürme sisteminin tasarımı yapılmıştır.

YÖRÜNGEDEN DÜŞÜRME SİSTEMİ

Sisteminin Küp Uydu İçindeki Konumu ve Kütlesi

Küp uydular belirli standartlar çerçevesinde boyutlandırılır ve tasarlanırlar. Örneğin, 3 birimlik bir küp uydu, 30×10×10 cm ile 34×10×10 cm arasında değişen boyutlara sahip olabilir. Bu çalışmada, 34×10×10 cm boyutlara sahip 3 birimlik bir nano-uydu için yörüngeden düşürme sistemi tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan sistemin uydu sistemi üzerindeki konumu Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Yörüngeden düşürme sisteminin küp uydu içindeki konumu.

Sistem tasarlanırken uzay ortamı reaksiyonları incelenmiş ve elektronik arızayı önlemek amacıyla gerekli yalıtım malzemeleri kullanılmıştır. 3 alt sistemden oluşan yörüngeden düşürme sistemi ve sistemin toplam kütlesi Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1: Yörüngeden düşürme sisteminin toplam kütlesi.

Alt Sistem Adı	Kütle (gr)
Kontrol Mekanizması (Kutu)	212.66
Yükseltme Mekanizması	110.53
Açılır Yüzeyler	219.11
Toplam	542.30

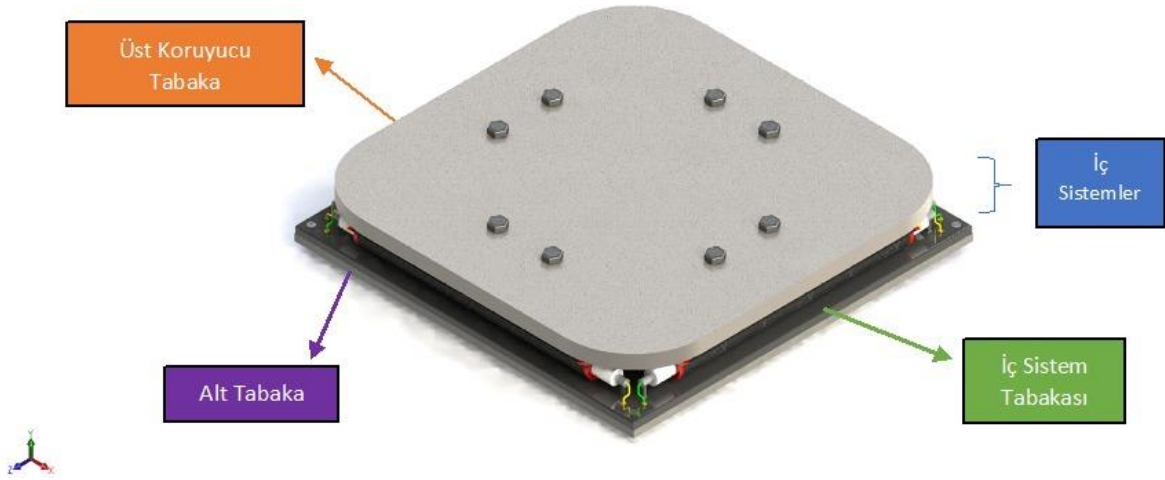
Sistemin Çalışma Prensibi

Yörüngeden düşürme sistemi, 3 alt sistemin birlikte uyum içinde çalışmasıyla görevini yerine getirmektedir. Yer istasyonu ile bağlantı halinde olan yörüngedeki uydu, gönderilen sinyaller ve alınan veriler doğrultusunda görev süresi dolduğu an, kontrol merkezi tarafından takibe alınır. Gerekli yönelim ve paneller aracılığı ile kontrol sağlandıktan sonra, güvenli bir şekilde yörüngeden düşürme sistemi devreye girer. OBDH (On-Board Data Handling) aracılığı ile güç ünitesinde bulunan EPS (Electrical Power System) kartına aktarılan veri alışverişi bir Arduino yazılım aracılığıyla kontrol edilir. Elde edilen güç bir enerji oluşturur ve motorlar yardımıyla yükseltme mekanizmasının hareketi sağlanır. Şekil 3’te çalışma kapsamında tasarlanan yükseltme mekanizması gösterilmiştir.



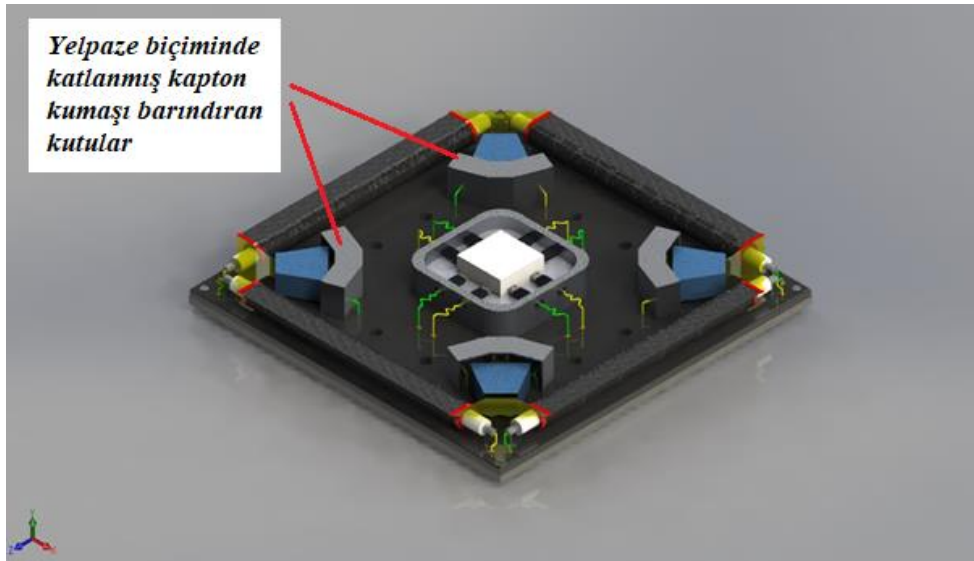
Şekil 3: Çalışma kapsamında tasarlanan yükseltme mekanizması.

Yükseltme mekanizma tablasının hemen üzerinde Şekil 4'te gösterilen ve açılır panelleri içerisinde barındıran bölüm bulunmaktadır.



Şekil 4: Açılır panelleri içeren bölüm.

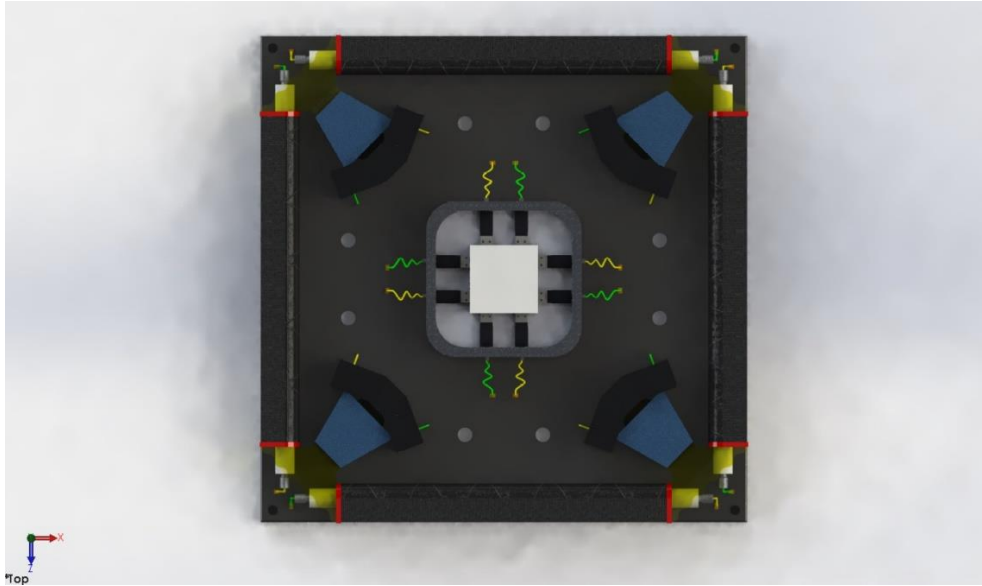
Yeterli yüksekliğe ve konuma ulaşan açılır yüzeyler, hareketli motorların yardımıyla "+" şekli oluşturacak şekilde açılır. Sistem açıldığında oluşacak olan sürüklenme kuvvetini artırarak daha verimli bir tasarım yapabilmek adına "+" şeklinde açılan paneller birbirlerine üçgen kesite sahip Kapton kumaşlarla bağlanmıştır. Sistemin açılmasıyla birlikte Şekil 5'teki kutucuklar içerisinde katlanmış bir yelpaze gibi depolanan bu üçgen kumaşlar, bağlı oldukları panellerin arasında gerilerek sistemin sürüklenme yüzey alanını mümkün mertebe arttırmaktadırlar. Şekil 5 ve 6'da sistemin depolandığı durumdaki görünümü, Şekil 7'de ise sistem açıldığında görünüm sunulmuştur.



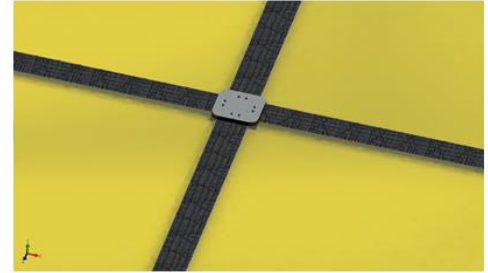
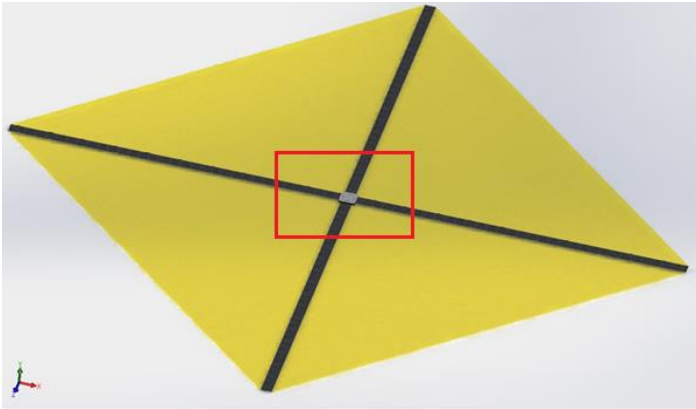
Şekil 5: Açılır panelleri içeren bölümün izometrik iç görünümü.

Yörüngeden düşürme sisteminin açılması, uydunun kesit alanını artırarak bulunduğu yörüngede daha fazla enerji kaybetmesine yol açar. Böylece uydunun görevini tamamladıktan sonra daha kısa süre içerisinde enerjisini kaybederek Dünya atmosferine girmesi sağlanır.

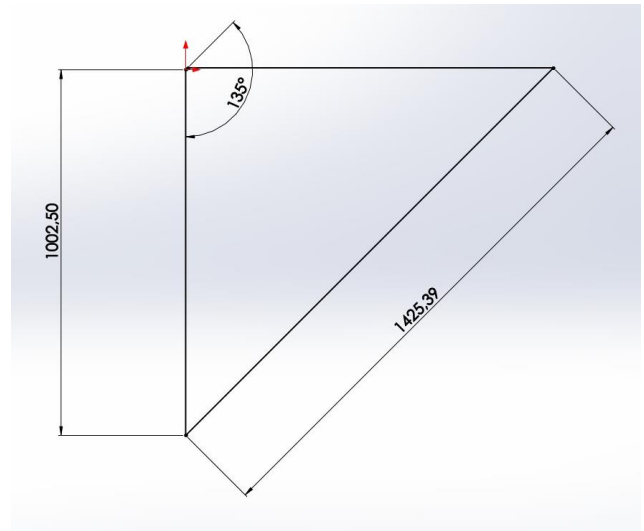
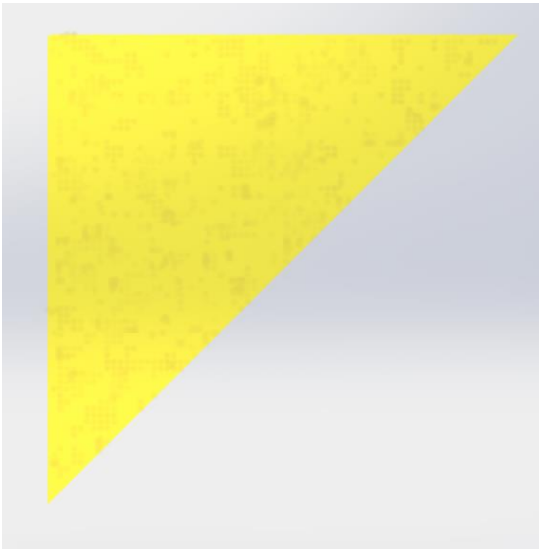
Şekil 8'de "+" şeklindeki kolları birbirine bağlayan üçgen kumaşın boyutları sunulmuştur.



Şekil 6: Açılır panelleri içeren bölümün üstten görünümü.

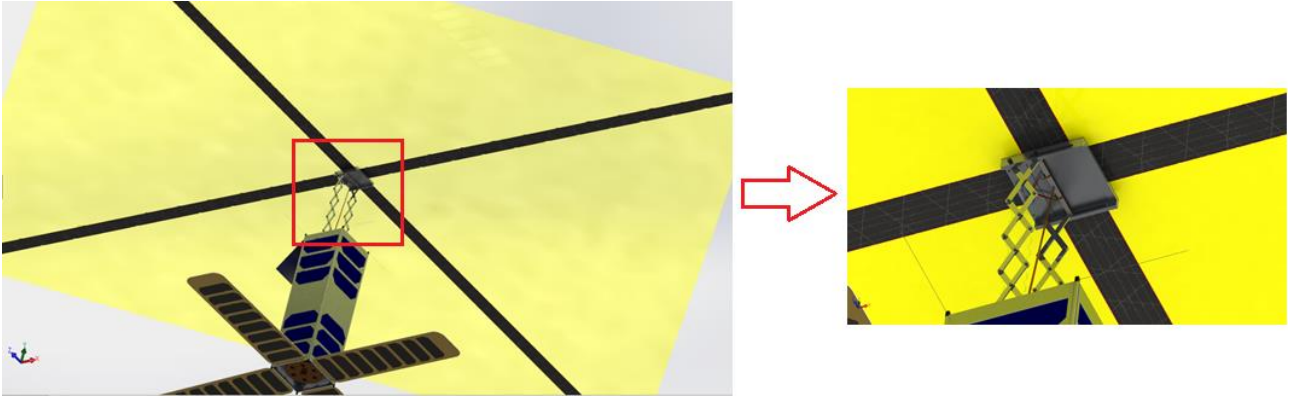


Şekil 7: Yörüngeden düşürme sistemi açıldığında görünümü.

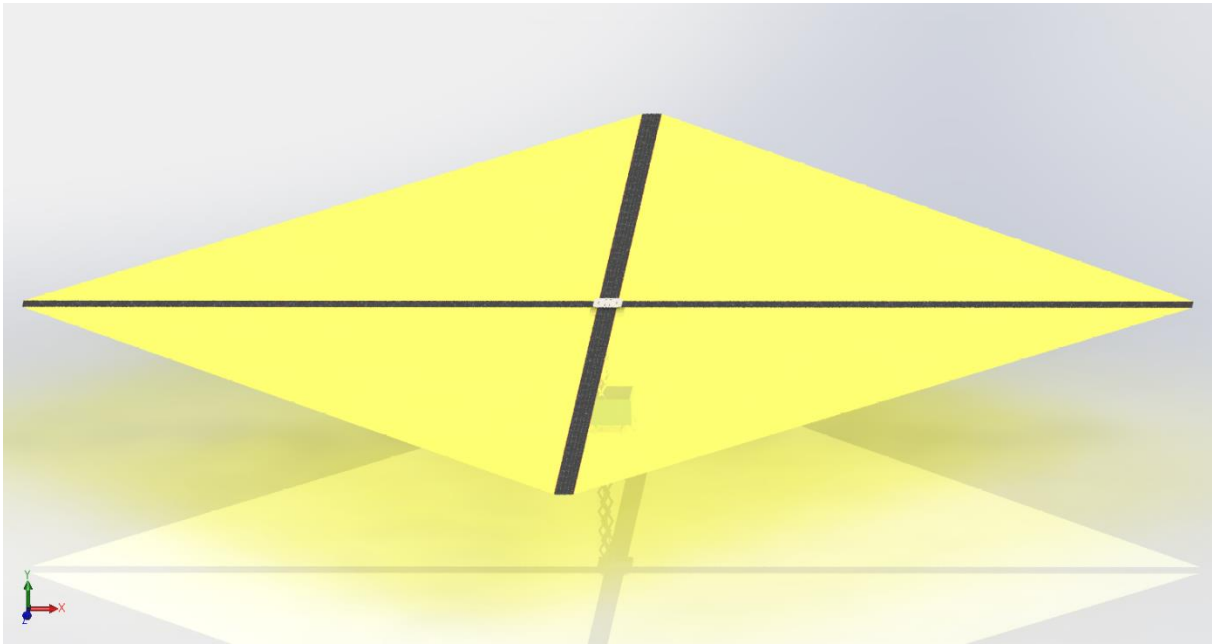


Şekil 8: Ana panelleri birbirine bağlayan üçgen kesitli kumaşın boyutları [mm].

Tasarlanan yörüngeden düşürme sisteminin açıldığı durumda 3 birimlik bir küp uydu üzerindeki görünümü Şekil 9 ve 10'da gösterilmiştir.



Şekil 9: Açılmış yörüngeden düşürme sisteminin alttan görünümü.



Şekil 10: Açılmış yörüngeden düşürme sisteminin üstten görünümü.

Yörüngeden Düşürme Süresi

Yere yakın yörüngede görev yapan bir uydunun yörüngeden düşme süresi; görev irtifasına, uydunun geometrisine ve uydunun kütlesine bağlıdır. Görev yapılan irtifa arttıkça hem atmosferik yoğunluk çok düşük seviyelere iner hem de uydunun Dünya'dan uzaklaştığından söz konusu yörüngede kalabilmesi için sahip olması gereken teğetsel hız azalır. Atmosferik sürüklenme kuvvetinin, hava yoğunluğu, hıza dik kesit alanı, geometrik sürüklenme katsayısı ve teğetsel hızın karesi ile doğru orantılı olarak arttığı göz önüne alındığında, uydunun görev irtifasının artması durumunda atmosferik sürüklenme kuvveti yardımıyla uydunun yörüngeden düşme süresi artar. Yere yakın yörüngeler için atmosferik sürüklemeyi kullanarak uyduyu yörüngeden düşürmek verimli olsa da daha üst yörüngelerde uyduyu atmosferik sürüklemeyi kullanarak yörüngeden düşürmek ya mümkün değildir ya da çok verimsizdir. Uydunun geometrisi, aerodinamik sürüklenme katsayısını belirleyen faktör olduğu için bu parametre de uydunun yörüngeden düşme süresini etkilemektedir. Silindirik geometriye sahip bir uydunun yörüngeden düşme süresi aynı kesit alanına sahip kübik bir uyduya göre daha kısadır. Ayrıca güneş panellerinin boyutları ve açısı da uydunun yörüngeden düşme süresini belirlemektedir. Geniş güneş panelleri aerodinamik sürüklenme kuvvetini artırarak uydunun daha kısa sürede yörüngeden düşmesini sağlar.

Çalışma kapsamında uydunun yörüngeden düşme süresinin analizi Systems Tool Kit (STK) yazılımı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Program aracılığıyla farklı atmosferik modeller kullanılarak yörünge parametreleri, yüzey kesit alanı, kütlesi ve sürüklenme katsayısı belirli bir uydunun yörüngeden düşme süresini yaklaşık olarak hesaplamak mümkündür. Farklı atmosferik modellerin

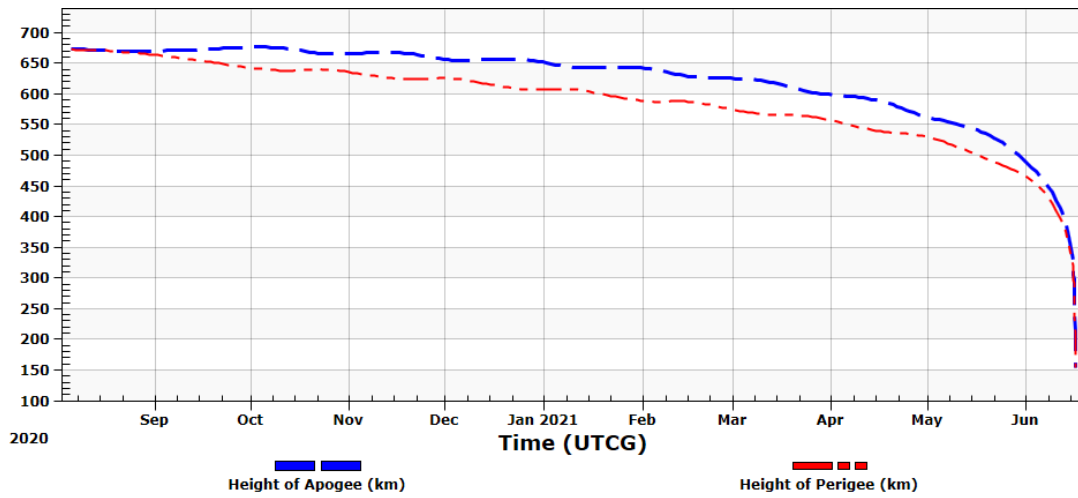
kullanılmasının sebebi olası en kısa ve en uzun yörüngeden düşme sürelerini hesaplayarak yapılan tasarımın olası her koşulda uyduyu 25 yıl içerisinde yörüngeden düşürebildiğini teyit etmektir.

Yörüngeden düşme süresi analiz edilen uyduya ait özellikler Tablo 2’de özetlenmiştir.

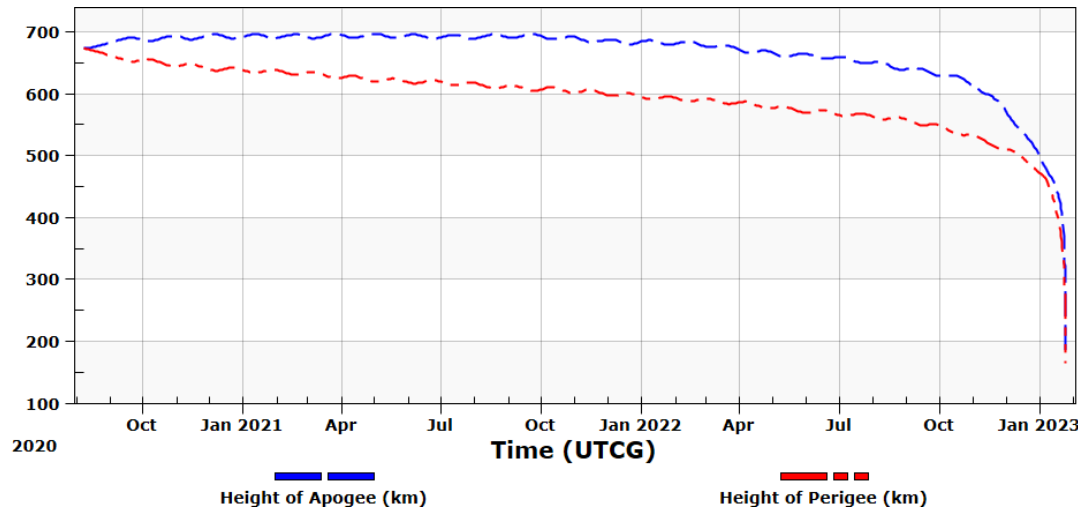
Tablo 2: Analiz edilen küp uydunun özellikleri

Parametre	Değer
Uydunun Kütlesi	4 kg
Yüzey Alanı	2.17m ²
Güneşe Maruz Kalan Alan	1.085 m ²
Sürükleme Katsayısı	2.2
Görev İrtifası	680 km

Tablo 2’de özellikleri sunulan uydunun görev irtifasından düşme süresi 1976 Standart modeline göre 313 gün, 1971 Jaiccha modeline göre 2.5 yıl olarak hesaplanmıştır. Şekil 11 ve Şekil 12 sırasıyla 1976 Standart ve 1971 Jaiccha modellerine göre uydunun irtifasının zamanla değişimini özetlemektedir.



Şekil 11: 1976 Standart modeline göre uydu irtifasının zamanla değişimi.



Şekil 12: 1971 Jaiccha modeline göre uydu irtifasının zamanla değişimi.

Şekil 11 ve 12’den görüldüğü atmosferik yoğunluğun ve dolayısıyla sürükleme kuvvetinin artmasıyla birlikte uydu 350 - 400 km irtifaya indikten sonra çok kısa süre içerisinde düşmektedir. STK yazılımında gerçekleştirilen analiz sonuçlarına göre tasarlanan yörüngeden düşürme mekanizması başarılı şekilde açıldıktan 313 gün ile 2.5 yıl arasında bir süre sonunda uydu yörüngeden düşmektedir. Uydunun yörüngeden düşmesinden kasıt atmosferik sürüklemenin aşırı düzeylere ulaşmasıyla birlikte uydu sisteminin parçalanması ve yok olması durumudur (Şekil 13).



Şekil 13: Uydunun Dünya atmosferine giriş anı.

SONUÇ

Çalışma kapsamında, 4 kg kütleyle sahip 3 birimlik bir küp uyduyu görev yaptığı yörüngeden 1 ile 2.5 yıllık bir süre zarfında düşürebilen bir yörüngeden düşürme sistemi tasarlanmıştır. Sistem “+” şeklinde 4 ana kolun açılması sonucunda görev yapmaya başlamaktadır. Açılır kollar birbirlerine üçgen keşide sahip kumaşlarla bağlanmış bu sayede yörüngeden düşürme sisteminin yüzey alanı hatırı sayılır derecede artırılmıştır. Bu bakımdan sistem benzer tasarımlara göre aynı özelliklere sahip bir küp uyduyu daha kısa süre içerisinde yörüngeden düşürmektedir.

Uydunun görev süresi tamamlandığında mevcut sistemin açılabilmesi için bataryalardan ya da güneş panellerinden enerji temin edilmesi gerekmektedir. Bu da uydunun güç sisteminde herhangi bir arıza olması durumunda sistemin açılmasını engelleyecektir. Gelecek çalışmalarda sistemin, uydu tarafından kullanılan herhangi bir güç kaynağına ihtiyaç duymadan açılabilir şekilde tasarlanması planlanmıştır.

Kaynaklar

- Blanco, E., 2017. *Design of a Scalable, Adaptable, and Reliable De-Orbiting Mechanism*, M.Sc. Thesis, Department of Computer Science, Electrical and Space Engineering, Luleå University of Technology.
- Guglielmo, D., Omar, S., Bevilacqua, R., Fineberg, L., Treptow, J., Poffenberger, B., ve Johnson, Y., 2018, *Drag Deorbit Device: A New Standard Reentry Actuator for CubeSats*, Journal of Spacecraft and Rockets, Cilt. 56, s. 1 – 17.
- Harkness, P., Mcrobb, M., Milligan, R., ve Clark, C., 2014. *Deployment Dynamics of AEOLDOS - An Aerodynamic End of Life DeOrbit System for CubeSats*, AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition, San Diego, ABD, 4 – 7 Ağustos.
- Lappas, V., Pellegrino, S., Guenat, H., Straubel, M., Steyn, H., Kostopoulos, V., Sarris, E., Tekinalp, O., Wokes, S., ve Bonnema, A. 2011. *DEORBITSAIL: De-orbiting of satellites using solar sails*, 2nd International Conference on Space Technology, Atina, Yunanistan, 15 – 17 Eylül.
- Maessen, D. C., van Breukelen, E. D., Zandbergen, B. T. C., Bergsma, O. K., 2006. *Development of a Generic Inflatable De-Orbit Device for Cubesats*, Delft University of Technology, Faculty of Aerospace Engineering.
- Tola, C., Aslan, R., ve İlarslan, M., 2011. *Development of a Mechanical De-orbiting System for 3-Unit Satellite*, 3rd Nanosatellite Symposium, Kitakyushu, Japonya, 12 – 13 Aralık.