

## EKF ve UKF TABANLI GÜNEŞ'E YÖNELME VEKTÖRÜ KESTİRİMİNDE DÜNYA ALBEDOSUNUN ETKİLERİ

Demet ÇILDEN GÜLER\*  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

### ÖZET

*Uzay araçları bir gezegen etrafında veya gezegenler arası olmak üzere bilimsel, haberleşme, meteoroloji, astronomi, uzaktan algılama, navigasyon, gözetleme, gözlem gibi amaçlarla kullanılmaktadırlar. Bu araçlar veya üzerindeki aletler kendi görevlerini başarabilmek için belirli yönlere veya noktalara yönlendirilmektedirler. Yönelim belirleme amacıyla kullanılan güneş algılayıcıları, güneş sistemindeki hem gezegen etrafında seyreden uydularda hem de gezegenler arası uzay görevlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Doğruluğu daha düşük olan kaba güneş algılayıcıları (coarse sun sensor - CSS) yalnızca güneşten gelen radyasyonu değil gezegenin albedosunu da ölçmektedir. Bu ölçümlerin, uçuş bilgisayarında, albedo modelinin dikkate alınmadan kullanılması durumunda yüksek derecede hataya sebep olduğu bilinmektedir. Aynı zamanda albedo değerleri, mevsime, coğrafyaya, zamana ve bulutluluk durumuna göre değişmektedir. Bu çalışmada da bu tür değişimleri dikkate alan albedo modelleri incelenmiştir. Albedo, güneş algılayıcılarının yanı sıra birçok algılayıcı ve alt sistemde de önem taşımaktadır. Örneğin, kamera veya yıldız algılayıcı gibi optik algılayıcı sistemlerinin seçiminde veya güç/ısı alt sistemlerin karakteristiklerinin belirlenmesinde önemli bir faktör olabilmektedir. Bu nedenle çalışmada geliştirilen albedo modülü herhangi bir alete ve gök cismine uygulanabilecek şekilde genelleştirilmiş bir yapıda tasarlanmıştır. Çalışmanın diğer önemli amacı ise, albedonun uzay aracının Güneş'e yönelme vektörü kestirimindeki etkisinin incelenmesidir. Bu amaca yönelik olarak güneş algılayıcısı ölçümleri üzerinde albedo modellenerek albedonun Güneş'e yönelme kestirimi açısından etkisi tespit edilmiştir. Dünya'ya ait albedonun güneş algılayıcısı üzerindeki etkisi de farklı benzetimler üzerinden değerlendirilmiştir.*

### GİRİŞ

Bir uzay aracının veya aletlerinin uzay görevlerini başarmak için belli noktalara yönlendirilmeleri gerekmektedir. Bu tür amaçlarla, manyetometre, ufuk algılayıcısı, yıldız algılayıcısı ve güneş algılayıcısı gibi yönelim algılayıcıları kullanılabilir. Bunlardan güneş algılayıcıları, güneş sistemindeki hem gezegen etrafında seyreden uydularda hem de gezegenler arası uzay görevlerinde kullanılmaktadır. Temelde, dijital güneş algılayıcıları (digital sun sensor - DSS) ve daha çok foto diyot formunda kullanılan kaba güneş algılayıcıları (coarse sun sensor - CSS) olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadırlar [Markley ve Crassidis, 2014]. CSS'ler, algılayıcı normu ile güneş istikameti arasındaki açının kosinüsü ile neredeyse doğru orantılı olarak fonksiyon gösterirler. Daha çok birden fazla CSS içeren platformlar şeklinde kullanılırlar.

Güneşe ve bir gezegene yeteri kadar yakın olan bir uzay aracı doğrudan gelen güneş akısını, gezegenden yansıyan ve yayılan radyasyonu içeren elektromanyetik radyasyonu alır. Bunlardan güneş akısı en büyük radyasyon kaynağı olmakla beraber albedo ise gezegene güneşten gelen ışın ile gezegenden yansıyan ışın arasındaki orandır. Bir uzay aracı gezegenin güneş alan kısmını gördüğünde albedoya maruz kalmaktadır. Fakat, albedo değerleri mevsime, coğrafyaya, zamana ve bulutluluk durumuna göre değişmektedir [Stephens vd., 2015]. CSS yalnızca güneşten gelen

\* Dr. Öğr. Üyesi, Uzay Müh. Böl., E-posta: cilden@itu.edu.tr

radyasyonu değil gezegenin albedosunu da ölçmektedir [Flatley ve Moore, 1994]. Bu nedenle, gezegene ait albedo, güneş algılayıcısı ölçümlerinde bir bozucu olarak devreye girmektedir. Yapılan bir çalışmada, albedonun güneş algılayıcısı ölçümlerini 20 dereceye kadar bozabildiği tespit edilmiştir [Bhanderi ve Bak, 2005]. Diğer bir yandan, albedo, kamera veya yıldız algılayıcı gibi optik algılayıcı sistemlerinin karakteristiklerinin seçiminde önemli bir faktör olabilmektedir. Örneğin, bir çalışmada, gezegenden yansıyan ve yayılan ışınların, bir uzay aracının ısı kontrol sisteminde dikkate alınması gerektiğinin altı çizilmektedir [Kuvyrkin ve Menshaw, 2016] çünkü bu etkilerin ısı yüklenmede yüksek dinamik değişimlere yol açabileceği söylenmektedir. Isıl analiz ile ilgili diğer bir çalışma [Peyrou-Lauga, 2017] ise Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi'ne (National Aeronautics and Space Administration - NASA) ait Clouds and Earth Radiant Energy System (CERES) ölçüm aletinden alınan albedo verisi kullanılarak hassas aletler ve radyatörlerin ısı kararlılığı için gerekli ısı durumlarının değerlendirilmesi için gerçekleştirilmiştir.

Güneş algılayıcılarının matematiksel modeli, dış bozuntuya sahip güneş algılayıcısı ölçümlerini temsil eden, gezegenden dağınık (diffuse) ve dik açılı (specular) olan yansımaları içerebilmektedir. Güneş algılayıcısı ölçümleri Ørsted uydusunun telemetri verilerini kullanarak doğrulanmıştır [Bhanderi, 2006]. Modellenen CSS akımlarının doğruluğu, ölçümlerde albedo modelinin kullanılmadığı duruma göre, Bhanderi'ye [2006] ait çalışmada üç kat, Lopes'e [2011] ait çalışmada ise dört kat geliştirilmiştir.

Genişletilmiş Kalman filtresi (extended Kalman filter - EKF) kullanılarak güneş yönü kestirim algoritması da [O'Keefe ve Schaub, 2014] çalışması tarafından uygulanmıştır. Albedo etkileyen CSS ölçümleri ile güneş yönü, jiroskop kullanıldığı durumda dört derece, kullanılmadığı durumda ise on derece doğrulukla kestirilmiştir [O'Keefe ve Schaub, 2014]. Buradan, albedonun güneş algılayıcısı ölçümlerini, özellikle jiroskop kullanılmadığı durumda, fazlaca etkilediği ve dikkate alınması gerektiği gözükmektedir.

Albedo modelini hesaplamalar açısından daha hızlı hale getirmek için, Brasoveanu ve Sedlak [1998] çeşitli uzamsal veriler yerine iki sabit albedo katsayısı uygulanmıştır. Analizlerdeki hatalar ortalama albedo katsayısı 0.30 yerine 0.105 olarak alınarak azaltılmıştır. Sunulan model çoğu kez düzeltilmemiş çıktılardan çok daha iyi bir CSS doğruluğu sağlasa da, 0.30 değerine dayanan kestirimleri bazen CSS'yi aşırı düzeltmiştir. Bu aşırı düzeltme, algılayıcı hatasının artmasına neden olmuştur. Aktif yüzey elemanlarına bağlı olarak albedo katsayısı değişikliklerini içeren detaylı matematiksel modelin en doğru durum için kullanılabilmesi ancak çevrimiçi kullanımın hesaplama açısından yüklü olduğu belirtilmektedir. Burada, albedo model karmaşıklığı nedeniyle, güneş algılayıcılarında albedo'ya duyarlı olmayan kısıtlayıcı bir filtre kullanmanın daha makul olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat bu önerinin DSS'ler için daha uygun olduğu bilinmektedir. Appel [2005], enlem ve boylam temelli fonksiyonlar dahil olmak üzere her albedo bileşeni için polinom fonksiyonlar yoluyla daha az karmaşık bir albedo modeli üretmiştir. Diğer bir çalışmada ise albedo kestirimi için oto-regresif (AR) modeli tabanlı ve albedo katsayılarına ihtiyaç duymayan basit bir albedo modeli önerilmiştir [Cilden-Guler vd., 2021]. Ayrıca aynı çalışmada, 2 derece doğruluk ile uzay aracı yönelim kestirimi algoritması da geliştirilmiştir. Bir başka çalışmada ise Güneş algılayıcısı ölçümlerindeki albedo etkisini çok katlı yapay sinir ağları yardımıyla 1 dereceye kadar azaltmaktadır [Sozen vd., 2021].

Uzay aracı dönme hareketine ve algılayıcı ölçümlerine uzay ortamından birçok dış bozucu etki etmektedir. Güneş sistemindeki uzay aracı görevlerinde herhangi bir gezegene belli bir mesafeye kadar yaklaşıldığında bu gezegenin albedosu da bu araçlara ve üzerindeki aletlere etki eder. Albedo, özellikle CSS gibi güneş yönünü belirlemek amaçlı kullanılan algılayıcılar üzerinde doğrudan etki ettiğinden yönelim için de önemlidir. Albedo gezegen yüzeyindeki modele uygun olarak uzay aracı üzerinde kullanılan alet ölçümlerine dahil edilmiştir. Albedo, güneş algılayıcılarının yanı sıra birçok algılayıcı ve alt sistemde de önem taşımaktadır. Bu nedenle geliştirilen albedo modülü herhangi bir alete ve gökcisminde uygulanabilecek şekilde genelleştirilmiş bir yapıda oluşturulmuştur.

Çalışma kapsamında gezegen albedosunun matematiksel olarak nasıl modellendiği, yörünge ve gezegen durumuna göre tutulma, yeryüzü şekilleri, mevsimsel değişimler, bulutluluk vb. parametrelerin albedo değerlerindeki etkisi ile albedonun uzay aracının Güneş'e yönelme vektörüne etkisi incelenmiştir.

## ALBEDO MATEMATİKSEL MODELİ VE VERİ PAKETLERİ

Enerjinin korunumunu kullanarak, uzay aracı pozisyonundaki gezegen albedosu radyasyon değeri hesaplanabilir [Flatley ve Moore, 1994]. Bu hesaplama için algılayıcı normali, güneş referans vektörü, gezegen birim alanlarının normali gibi vektör değerlerinin yanı sıra gezegene ait her bir birim alandan gelen albedo katkısı hesabı gerekmektedir.

Bir uzay aracında gezegenden bir aleti (örn. CSS) etkileyen toplam albedo için kullanılan matematiksel model bu bölümde verilmiştir. Albedoyu etkileyen parametreler, yönelim ve konum, aletin görüş alanı (FOV), diğer aletlerin yerleştirilmesi (engelleyebilecek/gölgelendirebilecek) ve mevsimsel değişiklikler, coğrafya ve bulutluluk gibi çeşitli parametrelerle ilişkili albedo katsayıları olarak sınıflandırılabilir.

Genel vektörler birim normal vektör ( $\hat{n}$ ), Güneş yönü vektörü ( $\hat{s}$ ), ve A'dan B'ye yön vektörü ( $\hat{r}_{AB}$ ) olarak tanımlanmaktadır.  $\hat{n}_A$  ve  $\hat{n}_i$  sırasıyla gezegen üzerindeki birim alanın ( $dA$ ) ve algılayıcı biriminin normal vektörünü ifade etmektedir.  $\hat{s}_p$  ve  $\hat{s}_i$  sırasıyla gezegenin ve algılayıcı biriminin Güneş yönü birim vektörlerini ifade etmektedir. Burada,  $r_{Ai}$  birim alandan algılayıcı lokasyonuna olan pozisyon vektörünü,  $\hat{r}_{Ai} = \frac{r_{Ai}}{\|r_{Ai}\|}$  ise birim yön vektörünü ifade etmektedir. Birim alandan  $dA$  uzay aracına olan yön vektörü ise  $\hat{r}_{sc}$  ile ifade edilmektedir.

Bir noktaya ulaşan Güneş akısı genel vektörler kullanıldığında  $F_{sun}(\hat{s} \cdot \hat{n})$  ile  $W/m^2$  biriminde hesaplanmaktadır. Buradan, birim alana ulaşan Güneş akısı ( $F_{in}$ ) [Flatley ve Moore, 1994],

$$F_{in} = F_{sun}(\hat{s}_p \cdot \hat{n}_A), \quad (1)$$

olarak hesaplanır ve  $F_{sun}$  atmosfer üzerindeki Güneş sabitidir. Güneş-gezegen ortalama mesafesine ulaşan ortalama akı değerine Güneş sabiti denmektedir. Güneş döngüsü ve gezegenin mesafesine göre küçük değişiklikler meydana gelmektedir. Dünya için bu sabit  $1366.1 W/m^2$ 'dir [Cilden-Guler vd., 2021]. Gelen Güneş akısı hem emilir hem de kısmi olarak yansır. Yansıyan kısmı ise albedo katsayısıyla ( $\alpha$ ) doğru orantılıdır.

$$\begin{aligned} F_{out} &= \alpha F_{in} \\ &= \alpha F_{sun}(\hat{s}_p \cdot \hat{n}_A). \end{aligned} \quad (2)$$

Enerjinin korunumu kullanılarak [Flatley ve Moore, 1994], uzay aracının bulunduğu yerdeki gezegen kaynaklı albedo radyasyonu,

$$F_{\alpha} = \frac{F_{sun}}{\pi} \iint_A \frac{\alpha(\hat{s}_p \cdot \hat{n}_A)(\hat{r}_{Ai} \cdot \hat{n}_A)(-\hat{r}_{Ai} \cdot \hat{n}_i)}{\|r_{Ai}\|^2} dA, \quad (3)$$

şeklinde hesaplanır. Denklem (3), toplam formunda ayrıklaştırılmış hale getirilirse [O'Keefe, 2015],

$$F_{\alpha} = \frac{F_{sun}}{\pi} \sum_{i=1}^{N_A} \frac{\alpha(\hat{s}_p \cdot \hat{n}_{A_i})(\hat{r}_{Ai} \cdot \hat{n}_{A_i})(-\hat{r}_{Ai} \cdot \hat{n}_i)}{\|r_{Ai}\|^2} \Delta A, \quad (4)$$

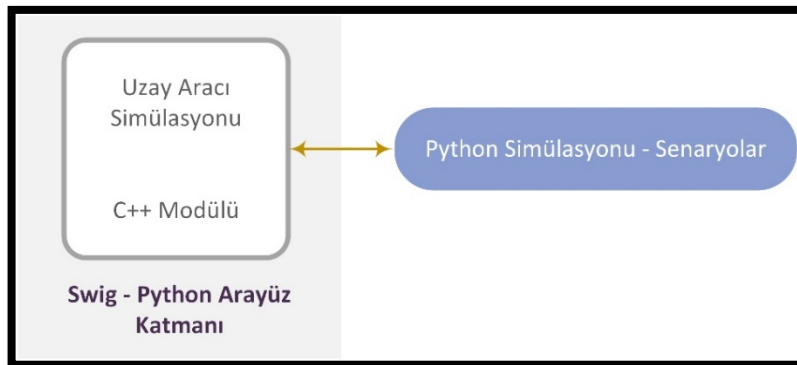
şekline dönüşür. Burada,  $N_A$ , kesişim alanında ( $A$ ) bulunan birim alanların ( $\Delta A$ ) sayısıdır.

Albedo katkıları gezegene ait albedo modeli (veri paketi) kullanılarak bulunabilmektedir [Bhanderi ve Bak, 2005; Kato vd., 2015; Loeb vd., 2009].

Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), ultraviyole bölgesinde Dünya atmosferi üstündeki albedoyu ölçmektedir [Mcpeters vd., 1998]. TOMS verileri, NASA'nın Earth Science Data and Information System (ESDIS) aracılığıyla halka açılmıştır. Veriler, 180 x 288 grid elemanı sayısı ve 1 x 1.25 derecelik enlem ve boylam çözünürlüğü ile paylaşılmaktadır. Program 1978'de Nimbus-7 ile başlamıştır ve 1991-1994 yılları arasında Meteor-3 ve 1996 ile 2006 yılları arasında Earth Probe ile devam etmiştir. Dünya'nın albedo katsayıları, Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), Terra, Aqua, Suomi NPP, NOAA-20 gibi çeşitli uydulara monte edilen CERES'den de elde edilebilmektedir [Doelling vd., 2013]. Veriler, bulutluluk/bulutsuzluk durumlarına göre 20 km yükseklikte yüzey albedosu veya atmosfer üstü albedosu (Top of the Atmosphere - TOA) olarak elde edilebilmektedir. CERES'ten bulutsuz durum için aylık ortalama TOA akıları, 1 km çözünürlükte bulutluluk ölçümü yapan başka bir algılayıcı verilerine göre tamamen bulutsuz olduğu zamanlar ve bölgeler için sağlanmaktadır [Kato vd., 2015; Loeb vd., 2009]. İlk CERES cihazı (PFM) TRMM'de uzaya gönderilmiştir ve şu anda Terra (FM1 ve FM2), Aqua (FM3 ve FM4), S-NPP (FM5) ve NOAA-20 (FM-6) platformları üzerinde yürütülmektedir. TRMM, hava ve iklim koşullarını incelemek için NASA ve Japonya Havacılık ve Uzay Araştırma Ajansı (Japan Aerospace Exploration Agency - JAXA) arasında gerçekleştirilen ortak bir görevdir. TRMM uydusu 1997'de CERES kullanarak veri toplamaya başlamış ve 2001'de sona ermiştir. NASA tarafından dairesel bir güneş senkronize kutup yörüngesiyle başlatılan Terra, bir Dünya gözlem görevidir. Latince su anlamına gelen Aqua, Dünya'nın su döngüsü hakkında toplanan büyük miktarda bilgi için gerçekleştirilmiş bir uydu görevidir. Hem Terra'da hem de Aqua'da kullanılan CERES, çıktılarının doğruluğu ve miktarı bakımından gelişmiş bir kalite sağlamaktadır. En uzun veri kapsamı, halen kullanımda olan Terra-Aqua uydu çiftinden alınmaktadır. Saatlik, günlük ve aylık uydu çifti verileri Temmuz 2002'den itibaren mevcuttur.

Albedo katsayısı ( $\alpha$ ), sıfır ve bir arasında değişen, yansıyan ve gelen Güneş radyasyonlarının oranıdır. Güneş sistemindeki en yansıtıcı gezegen Venüs'tür ve ortalama albedosu 0.76 civarındadır [Titov vd., 2007]. Dünya'nın ortalama albedosu zamanla değişse de son 40 yılda ortalama 0.29'a yaklaşmıştır ve küresel ortalama albedoda sadece %0.2 yıllar arası değişkenliğe sahiptir [Stephens vd., 2015]. Tartışıldığı gibi birçok parametreye bağlı olan gerçek duruma yakın karmaşık bir albedo modellemem için sabit bir küresel albedo katsayısı kullanılabilir. Fakat bu tür basit gezegen albedo modelinin kullanımı yeterince doğru olmayan sonuçlara yol açabilir [Brasoveanu ve Sedlak, 1998].

Colorado Üniversitesi, Boulder bünyesinde geliştirilmiş, açık kaynak kodlu ve herkesin kullanımına açık olan astrodinamik yazılımı, hesaplamada hızlı bir altyapı sağlamakta, uzay aracı temelli görev benzetimi çalışma çerçevesi oluşturmaktadır [Margenet vd., 2016]. Yazılım, gerçek zamanlı benzetimlerden hızlı, tekrarlanabilir Monte-Carlo benzetim seçenekleri içeren, gerçek zamanlı seçenekler de sunan bir astrodinamik mimarisidir. Bu paket, Python'ın kolay yazımını ve yeniden ayarlanabilirliğini içerirken, C/C++ dilinin uygulama hızını sağlayabilmektedir. Yazılım içerisinde ulaşılabilecek albedo modülünün tamamı C++ dilinde yazılarak, SWIG (Simplified Wrapper and Interface Generator) ara yüzü sayesinde Python kullanıcı girişleri ile çalıştırılabilmektedir (Şekil 1).

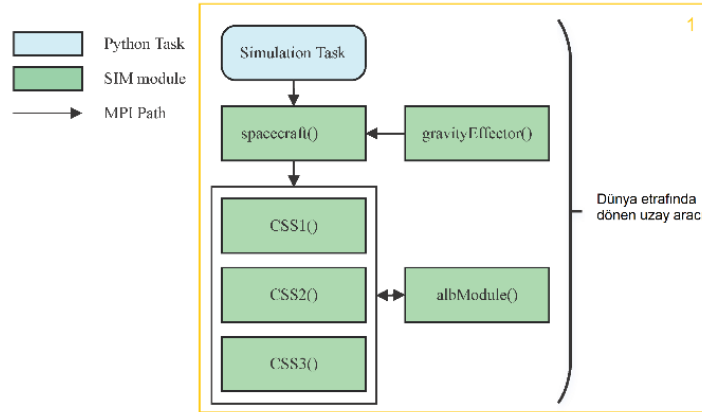


Şekil 1: Açık kaynak kodlu modül - senaryo şeması.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde albedo modülü temelinde oluşturulan senaryolar ve bulgular tartışılmaktadır. Albedo modülü istenilen herhangi bir algılayıcının (CSS, termal ekipman, güç ünitesi, kamera vb.) uzay aracı

üzerindeki lokasyonuna bağlı olarak albedo değerini hesaplayabilmektedir. Böylece, yalnızca CSS için değil eklenebilecek farklı algılayıcılar için de albedo değerleri uygun olan çıkış ile (birim, radyasyon) kullanılabilir. Bir alet yapılandırması için aletin yarı görüş açısı, birim normal vektörü ve uzay aracı merkezine göre aletin pozisyon vektörü bilgileri gerekmektedir.

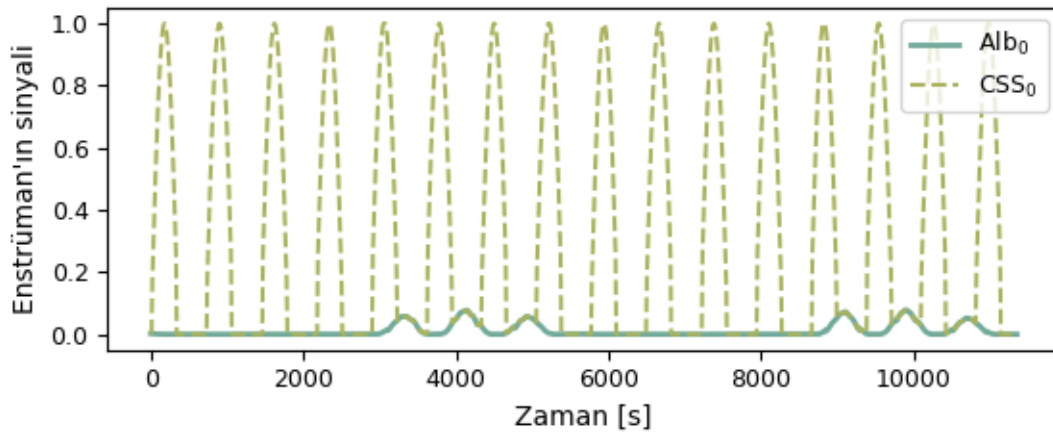


Şekil 2: Albedo modülü kullanılarak gerçekleştirilen senaryo şeması.

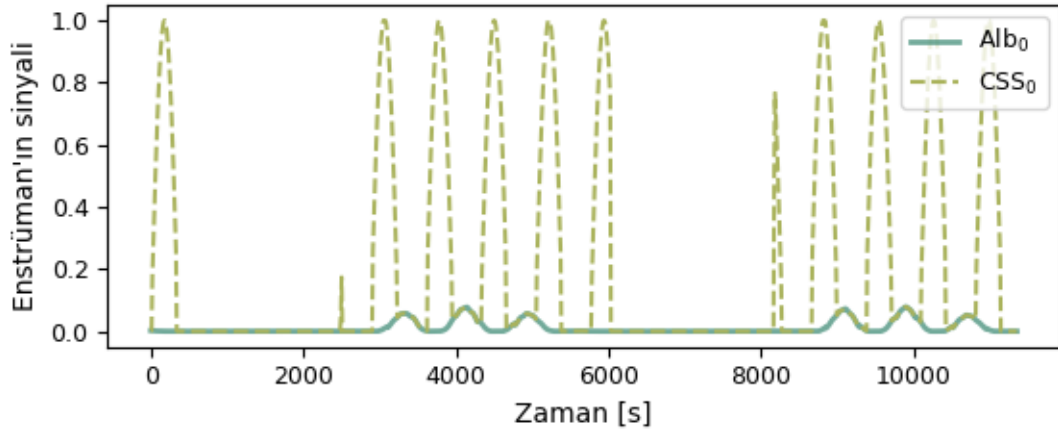
Gezegenlerin durumlarını belirlemede NASA'nın geliştirdiği Spice aracı kullanılmaktadır [NASA Jet Propulsion Laboratory, 2021]. Birden fazla gezegen eklemek için bu komutların tekrarlanması gerekmektedir. Albedo modülü, albedo modellerinden biri kullanılarak oluşturulmaktadır. Örneğin, belirtilen dosya adı ve veri paketi uzantısı bilgileri kullanılarak albedo katsayı verilerine dayanan ya da ortalama bir albedo değerine dayanan bir model kullanılabilir. İsteğe bağlı bir giriş olan tutulma durumu, belirtilirse gölge faktörü albedo modülü tarafından CSS üzerindeki çıkışlar için otomatik olarak hesaplanmaktadır. Şekil 2'de belirtilen senaryo, albedo veri paketi kullanımı, birden fazla alet kullanımı, birden fazla gezegen kullanımı, tutulma durumunun dahil edilmesi, benzetim zaman basamağı girişleri değiştirilerek gerçekleştirilebilir. Daha net olması için şekil üzerinde yazılım içerisinde kullanılan paketler orijinal dilinde bırakılmıştır.

### Dünya Etrafında Dönen Uzay Aracı

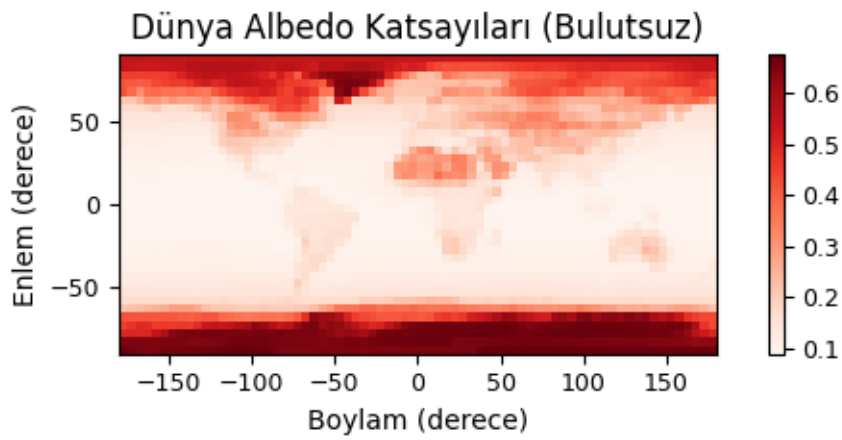
500 km irtifada Dünya etrafında ekvatorial düzlemde dönen bir uzay aracı ele alınmıştır. Dünya albedo verisi kullanan, bir adet CSS ile Dünya etrafında yörüngeye sahip bir uzay aracı ele alınmıştır. Şekil 3 tutulmanın CSS hesaplarında kullanılmadığı, Şekil 4 ise kullanıldığı durumu göstermektedir. Kullanılan Dünya'ya ait albedo verileri CERES'ten 2018 yılına ait 5x5 derece grid çözünürlüğündeki bulutsuz veri paketinden kullanılmıştır (Şekil 5). Uzay aracının 2 periyotluk yörüngesi incelenmiştir. Albedonun burada tutulma dışında yaklaşık %10 katkı yaptığı gözükmemektedir. Bu değerler, CSS'nin konumu, görüş açısı ve yönelimi ile değiştiğinden birden fazla CSS'nin kullanıldığı durum da incelenmiştir.



Şekil 3: Bir adet CSS'e ait sinyal ve albedo bozucusu (Tutulma ihmal edilen durum).

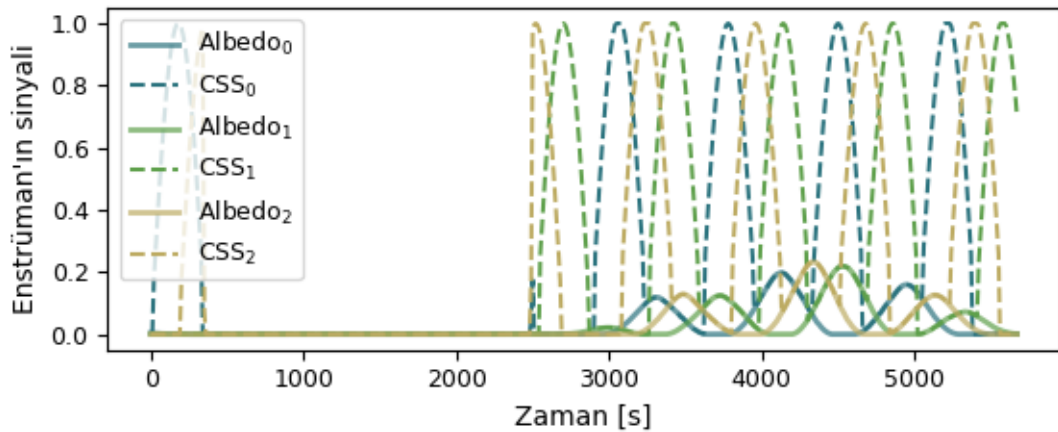


Şekil 4: Bir adet CSS'e ait sinyal ve albedo bozucusu (Tutulma dahil edilen durum).

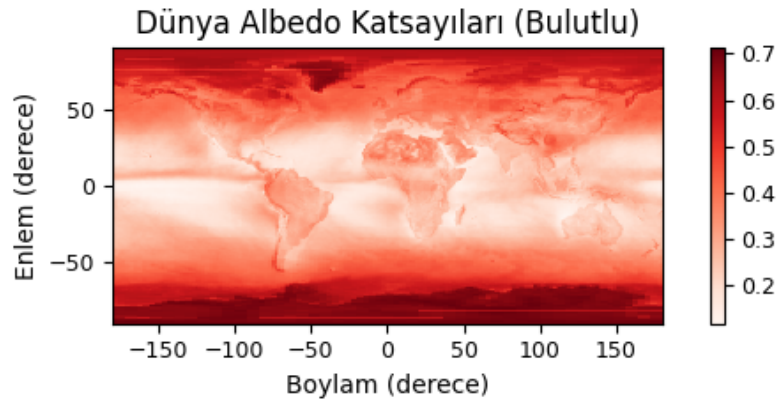


Şekil 5: Dünya albedo katsayı dağılımı (Bulutsuz durum, CERES 2018, 5x5 grid).

Birden fazla CSS kullanılan durum için 3 adet Güneş algılayıcısı benzetime dahil edilmiştir. Görselleştirmede daha net gözükmesi için uzay aracının bir periyotluk zaman dilimi Şekil 6'da sunulmuştur. Burada Şekil 7'de gösterildiği gibi 1x1 çözünürlüklü CERES'in 2018 yılı ortalama bulutlu durum veri paketi kullanılmıştır. Bulutlu durum verileri kullanıldığı durumda başka herhangi bir parametrenin değiştirilmemesine rağmen bir önceki duruma göre yaklaşık 2 katı kadar yani yaklaşık %20'lik albedo katkısının olduğu gözükmektedir.



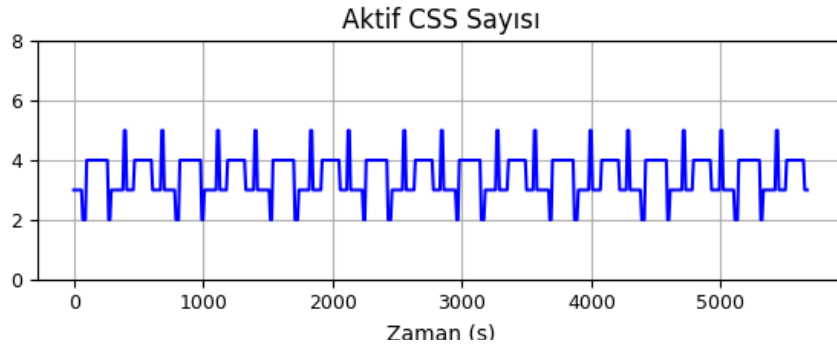
Şekil 6: Üç adet CSS'e ait sinyal ve albedo bozucusu (Tutulma dahil edilen durum).



Şekil 7: Dünya albedo katsayı dağılımı (Bulutlu durum, CERES 2018, 1x1 grid).

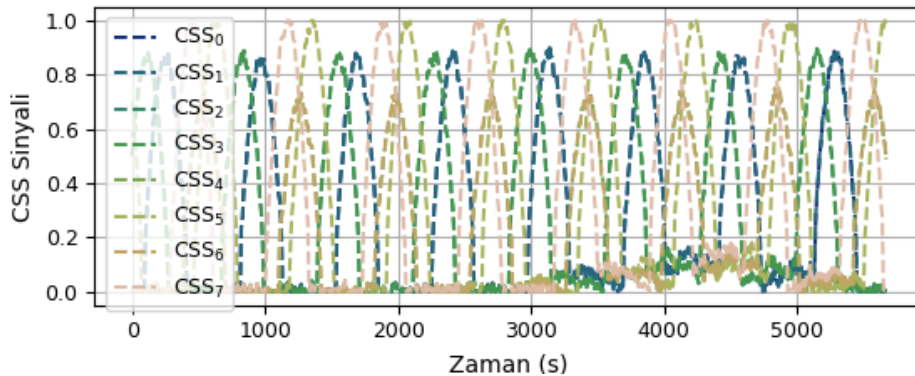
### Güneş'e Yönelme Vektörü Kestiriminde Albedo Bozucusu

Güneş'e yönelme vektörünü elde etmek için platform üzerinde CSS paketi ve Kalman filtresi temelli kestirim kullanılmıştır. Platformlar, her birinde 4 birim olacak şekilde piramit yapısında oluşturulmuştur. Bu bölümde uzay aracı parametreleri önceki bölümlerde olduğu gibi kullanılmış, yalnızca albedo etkisi incelenecek gezegene göre irtifa değerlerinde uzay aracı düşük irtifada kalacak şekilde değişiklik yapılmıştır. Amaç Güneş'e yönelme vektörünü tespit etmek olduğundan tutulma periyodu göz önüne alınmamıştır. Öncelikle Dünya etrafında dönen bir uydu ele alınmıştır ve 0.017 (birimsiz) standart sapmaya sahip gürültü ile modellenmiştir (sıfır ortalamalı Gaussian gürültü). Toplam zaman ise daha net inceleyebilmek için bir yörünge kadarlık kısım olarak ele alınmıştır. Öncelikle, albedo etkisi olmadan Güneş'e yönelme vektörü kestirimi hem EKF hem de Sezgisiz Kalman filtresi (unscented Kalman filter - UKF) kullanılarak sunulmuştur. Aktif CSS, üzerinde herhangi bir sinyal olan CSS'yi ifade etmektedir. Burada aktif olarak kullanılan CSS sayısı simülasyon periyodu boyunca Şekil 8'de verilmiştir.

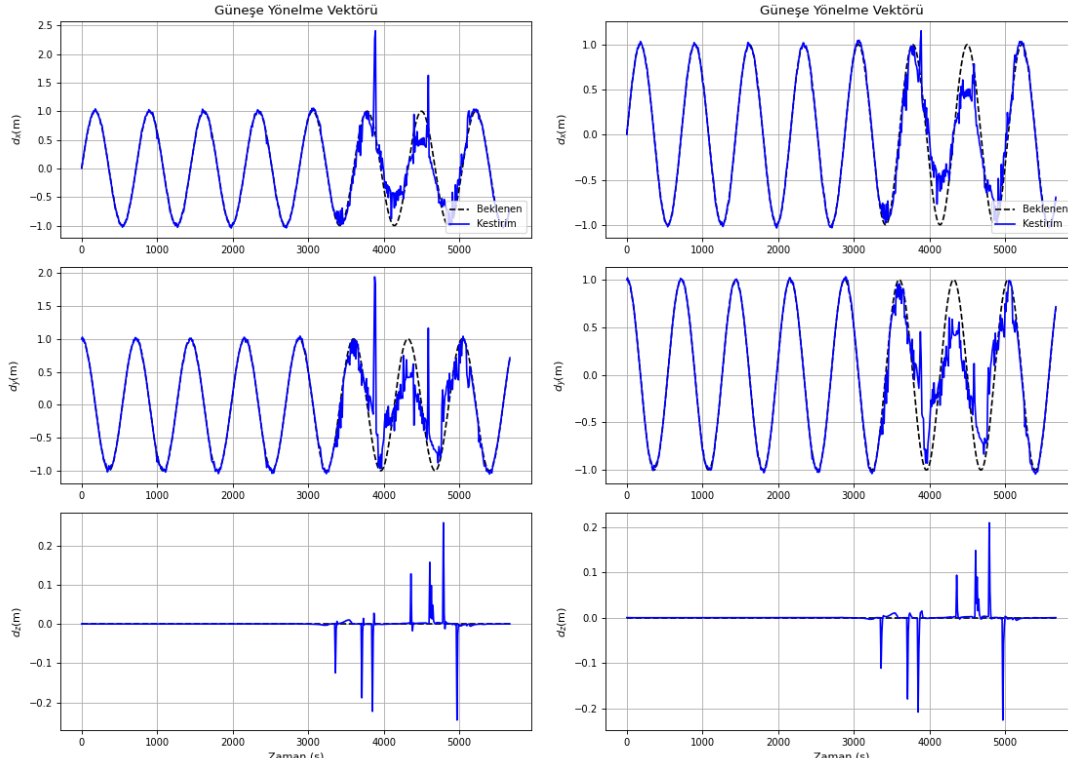


Şekil 8: Aktif CSS sayısı.

Bulutlu albedo veri paketinin kullanıldığı durumdaki CSS sinyallerinin değişimi Şekil 9'da sunulmuştur. Yaklaşık 3000. saniyeden sonra albedo etkileri bu sefer daha net görülmektedir. Şekil 10'da görüldüğü gibi albedo bozucu etkisi ile her iki kestirimde de yüksek mertebede bozulmalar saptanmıştır. Diğer durumlara göre oranını daha net görebilmek için ortalama hata değerleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 9: Albedo katkısı durumunda CSS sinyali (Bulutlu durum).



Şekil 10: Albedo katkısı durumunda EKF (sol) ve UKF (sağ) kestirimi (Bulutlu durum).

Tablo 1'de Güneş'e yönelme vektörünün kestirilen yönü ile benzetimi yapılan yönü arasındaki açıların ortalama değerleri verilmiştir. Şekillerin tamamlayıcı bir tablosu olarak sunulmuştur. Buradan da gözüktüğü gibi bulutlu durumda albedo katkısı da arttığından kestirimler olumsuz yönde etkilenmiştir. Diğer bir çıktı ise UKF'nin her durum için kestirim hatasının daha düşük olduğudur. Böylece albedonun Güneş'e yönelme vektörü kestirimlerini bulutsuz durumda yaklaşık 0.4 derece, bulutlu durumda ise yaklaşık 2.5 derece etkileyebildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 1: Güneş'e yönelme vektörü ortalama kestirim hatası.

Yönelim hatası (derece)		
Dünya ekvatorial yörünge	EKF	UKF
Albedo = 0	0.3286	0.2416
Albedo Veri Paketi (Bulutsuz)	0.4779	0.3982
Albedo Veri Paketi (Bulutlu)	2.6653	2.3568

## SONUÇ

Bu çalışmada, Güneş'e ve Dünya'ya yeterince yakın, yani her ikisinden de gelecek radyasyonun sıfırdan büyük olduğu durumda, bir uzay aracı gözlemlenmiştir ve üzerindeki güneş algılayıcısı direkt güneş radyasyonuna ek olarak gök cisiminden yansıyan ışınlar da maruz kalmakta ve her ikisini de ölçmektedir. Gezegenlerin albedo verileri CERES cihazından elde edilmiştir. Dünya için kullanılan albedo veri seti farklı sınıflandırmaları içermektedir, bu sebeple hem yıllık, mevsimsel, coğrafi duruma hem de açık/kapalı gök yüzü durumlarına göre inceleme yapılabilmiştir. Veriler değerlendirildiğinde, Dünya'nın maksimum albedosunun bulutlu durum altında ve kutup bölgelerinde olduğu tespit edilmiştir. Kıta ve deniz bölgeleri, beklenildiği üzere özellikle açık gökyüzü koşullarında daha net belli olmaktadır. Albedo, algılayıcı görüş alanı içinde gezegenin aydınlık bölgesindeki her



bir birim alandan güneş algılayıcılarına katkıda bulunmaktadır. Albedo yoğunluğu, gezegene yaklaştıkça güneş algılayıcısı üzerinde daha yüksek bir etkiye sahiptir.

Dünya'nın albedo etkilerinin irdelenmesinin ardından iki adet piramit yapısında CSS platformuna sahip 500 km irtifadaki bir uzay aracı modellenerek albedonun Güneş'e yönelme vektörüne etkisi incelenmiştir. Dünya yörüngesindeki uzay aracı için albedonun Güneş'e yönelme vektörü kestirimlerini bulutsuz durumda yaklaşık 0.4 derece, bulutlu durumda ise yaklaşık 2.5 derece etkileyebildiği sonucuna ulaşılmıştır.

### TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 120M859 projesi ile kısmi olarak desteklenmiştir.

### Kaynaklar

- Appel, P. 2005. "Attitude estimation from magnetometer and earth-albedo-corrected coarse sun sensor measurements" İçinde *Acta Astronautica* (C. 56, ss. 115–126).
- Bhanderi, D. 2006. "Modeling Earth Albedo Currents On Sun Sensors for Improved Vector Observation" İçinde *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. Colorado, USA.
- Bhanderi, D., Bak, T. 2005. "Modeling Earth Albedo for Satellites in Earth Orbit" İçinde *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. San Francisco, California.
- Brasoveanu, D., Sedlak, J. 1998. "Analysis of Earth Albedo Effect on Sun Sensor Measurements based on Theoretical Model and Mission Experience" İçinde *AAS/GSFC 13th International Symposium on Space Flight Dynamics* (C. 1, ss. 435–447).
- Cilden-Guler, D., Schaub, H., Hajiyev, C., Kaymaz, Z. 2021. "Attitude Estimation with Albedo Interference on Sun Sensor Measurements" *Journal of Spacecraft and Rockets*, 58(1), 148–163.
- Doelling, D. R., Loeb, N. G., Keyes, D. F., Nordeen, M. L., Morstad, D., Nguyen, C., ... Sun, M. 2013. "Geostationary enhanced temporal interpolation for ceres flux products" *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 30(6), 1072–1090.
- Flatley, T. W., Moore, W. A. 1994. "An Earth Albedo Model: A Mathematical Model for the Radiant Energy Input to an Orbiting Spacecraft Due to the Diffuse Reflectance of Solar Radiation From the Earth Below". Technical Memorandum 104596, National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD. Tarihinde adresinden erişildi <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19940020024>
- Fontana, A. 1967. "The Effect of Planetary Albedo on Solar Orientation of Spacecraft". Tarihinde adresinden erişildi <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19670026393/downloads/19670026393.pdf>
- Kato, S., Loeb, N. G., Rutan, D. A., Rose, F. G. 2015. "Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Data Products for Climate Research" *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 93(6), 597–612.
- Kuvyrkin, G. N., Menshaw, T. M. 2016. "Earth's Albedo Input to a Low-Earth-Orbit Satellite based on Local Albedo Coefficients" *Journal of Spacecraft and Rockets*, 53(4), 792–796.
- Loeb, N. G., Wielicki, B. A., Doelling, D. R., Smith, G. L., Keyes, D. F., Kato, S., ... Wong, T. 2009. "Toward Optimal Closure of the Earth's Top-of-Atmosphere Radiation Budget" *Journal of Climate*, 22(3), 748–766.
- Lopes, R. V. F., Silva, A. R., Relloso, J., Absi, G., Jun, Y. 2011. "Analysis of Albedo Effects on Coarse Sun Direction Determination Algorithms" İçinde *22nd International Symposium on Space Flight Dynamics*. Sao Jose dos Campos, Brazil.
- Margenet, M. C., Schaub, H., Piggott, S. 2016. "Modular attitude guidance development using the basilisk software framework" İçinde *AIAA Space and Astronautics Forum and Exposition, SPACE 2016*. American Institute of Aeronautics and Astronautics Inc, AIAA.
- Markley, F. L., Crassidis, J. L. 2014. "Sensors and Actuators" İçinde *Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control* (ss. 123–181). New York, NY: Springer New York.
- Mcpeters, R. D., Bhartia, P. K., Krueger, A. J., Herman, J. R., Wellemeyer, C. G., Seftor, C. J., ... Cebula, R. P. 1998. "NASA Technical Publication Earth Probe Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Data Products User's Guide". Greenbelt, Maryland. Tarihinde adresinden erişildi <https://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/media/docs/epusrguide.pdf>

- NASA Jet Propulsion Laboratory y.y. "The SPICE Concept". Tarihinde 30 Kasım 2021, adresinden erişildi <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/spiceconcept.html>
- O'Keefe, S. A. 2015. "*Autonomous Sun-Direction Estimation Using Partially Underdetermined Coarse Sun Sensor Configurations*" *Aerospace Engineering Sciences Graduate Theses & Dissertations*. Aerospace Engineering Sciences Graduate Theses & Dissertations, University of Colorado Boulder. Tarihinde adresinden erişildi [https://scholar.colorado.edu/asen\\_gradetds/95](https://scholar.colorado.edu/asen_gradetds/95)
- O'Keefe, S. A., Schaub, H. 2014. "Sun-direction estimation using a partially underdetermined set of coarse sun sensors" *Journal of the Astronautical Sciences*, 61(1), 85–106.
- Peyrou-Lauga, R. 2017. "Using Real Earth Albedo and Earth IR Flux for Spacecraft Thermal Analysis" İçinde *47th International Conference on Environmental Systems*. Charleston, South Carolina.
- Sozen, S. N., Gokce, M., Yavuzylmaz, C., Gulmammadov, F., Soken, H. E. 2021. "Measurement correction of a set of analog sun sensors via neural network" 2021 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, MetroAeroSpace 2021 - Proceedings, 19–24.
- Stephens, G. L., O'Brien, D., Webster, P. J., Pilewski, P., Kato, S., Li, J. 2015. "The albedo of Earth" *Reviews of Geophysics*, 53(1), 141–163.
- Titov, D. V., Bullock, M. A., Crisp, D., Renno, N. O., Taylor, F. W., Zasova, L. V. 2007. "Radiation in the atmosphere of Venus" (ss. 121–138).