

HABERLEŞME UYDULARINDA YÜZEY ELEKTRİKLENMESİNİN SPIS İLE İNCELENMESİ

Arif Armağan GÖZÜTOK¹ ve Zerefsan KAYMAZ²
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

ÖZET

Uyduların bulunduğu plazma ortamı elektriksel olarak pozitif ve negatif yüklü parçacıklardan meydana gelmektedir. Bu uzay plazma ortamının uydu yüzeylerindeki materyal özelliklerine bağlı olarak uydular üzerinde yarattığı etkiler uygun koşullar ve çevre şartları altında kritik boyutlara ulaşabilmektedir. Uydu ve uzay sistemlerinde meydana gelen uçuş esnasında yaşanan elektriksel anomalilerin çoğunluğunu plazma ortamının sebep olduğu yüklenmeden kaynaklanan olaylar meydana getirmektedir. Bu çalışmada GEO yörüngedeki bir haberleşme uydusu için farklı uzay ortamı senaryolarında yüzey elektriklenmesi durumları yapılan simülasyonlar ile karşılaştırmalı şekilde modellenmiştir. Elde edilen sonuçlardan mutlak ve diferansiyel yüklenmenin doğrusala yakın bir davranış sergilediği gözlenmektedir.

GİRİŞ

Uzay ortamı ile ilgili yapılan yakın tarihli çalışmalar göstergesinde uzay araçlarında meydana gelen anomalilerin çoğunluğunu yüzey elektriklenmesi ve dielektrik iç yüklenme olaylarının meydana getirdiği görülmektedir. Yüzey yüklenmesinin temel nedeni, Dünya'nın manyetosferine çeşitli uzay ortamı koşullarında girmekte olan – yüklü elektron ve + yüklü iyonlardır. Dünya'nın manyetosferinin iç katmanlarında da bu yüklü parçacıkların hapsedikleri iç ve dış olmak üzere iki adet radyasyon kuşağı (Van Allen radyasyon kuşakları) bulunmaktadır. Bu kuşaklar yüklü parçacıkların diğer ortamlara ve yörüngelere göre çok daha yoğun olduğu bölgelerdir ve kuşakların içerisindeki yüklü parçacık miktarı güneş aktivitelerine göre değişkenlik gösteren bir trend sergilemektedir.

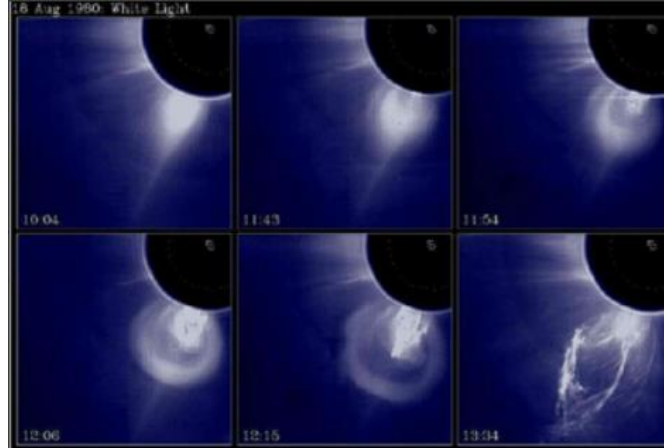
Geçmişten günümüze kadar olan süreçte haberleşme uydularında meydana gelen problem ve anomali istatistiklerine bakıldığında 1960-1984 yılları arasında anomalilerin beşte biri, 1989 – 1992 arası onda biri, 1993'ten günümüze kadar olan anomalilerin ise yedide biri uzay ortamı kaynaklı anomali durumlarıdır. Uzay havası kaynaklı bu anomaliler enerji bakımından başta güneş sistemi dışından gelen galaktik kozmik ışınlar olmak üzere, Van Allen radyasyon kuşakları içerisinde tutulan güneş kaynaklı yüksek enerjili atom altı parçacıklar olan proton (güneş rüzgarları, koronal kütle salınımları (CMEs), güneş alevi (solar flare) gibi olaylar sonucu), elektron, nötronlar ve daha ağır iyonize parçacıklar sebebiyle meydana gelmektedir. Bu gibi aktivitelerin sonucunda uydunun ömrü boyunca karşılaşacağı etmenler uzun dönemli etkiler olarak optik ve termal yüzeylerde aşınma ve yaşlanma, erozyon, kirlilik (kontaminasyon), gürültülü sinyal alımı, tekil olay durumları (single event effect – SEE), elektrostatik deşarj (ESD) ve mikro-meteoroid gibi olaylar olarak gözlemlenmektedir.

Manyetosfer, elektriksel olarak yüklü parçacıkların serbestçe dolaştığı kendine has dinamik mekanizmaların bulunduğu plazma ortamıdır. Alçak (LEO), Orta (MEO) yörünge ve haberleşme uydularının bulunduğu yer eş zamanlı (GEO) yörünge uydularının bulunduğu bu dinamik ortamdaki elektron ve iyon yoğunluğu 11 yıllık periyodik güneş döngüsüne ve oluşma zamanlarını tahmin etmesi güç olan güneş olaylarına (Koronal kütle salımı – CME, Co-rotating interaction region – CIR, Güneş alevi vb.) bağlıdır. Koronal kütle atımları iyon ve elektronların manyetosfere girerek plazma ve iyon yoğunluğunun artmasına, uydu ve uzay araçlarının yüzeylerinde mutlak (absolute charging) ve diferansiyel (differential charging), daha iç kısımlarındaki elektronik devrelere nüfuz eden daha yüksek enerjili ve ağır iyonlar ise dielektrik iç yüklenme (internal charging) gibi olaylara neden olmaktadır. Şekil 1'de Ağustos 1980'de yapılan bir CME gözleminin fotoğrafları görülmektedir. Başlıca GEO yörüngede foto-emisyonun olmadığı Mart – Eylül aylarında gölgelenme dönemlerindeki bir saatin üzerinde sürebilen tutulma zamanlarında uydu yüzeyi 10'larca kV'luk negatif potansiyellere

¹ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Atmosfer Bilimleri, E-posta: agozutok@itu.edu.tr

² Prof. Dr., Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Müh. Böl., E-posta: zerefsan@itu.edu.tr

erişebilmektedir. Bu koşullar altında, elektrik güç, yörünge yönelim ve kontrol gibi kritik uydu alt sistemlerinde anomalilerin meydana gelme ihtimali artmaktadır. Bunların istatistiksel olarak çoğunluğu gece yarısı ve sabah sektörlerinde gerçekleşmektedir [Lai ve diğ., 2017].



Şekil 1: 18 Ağustos 1980 CME gözlemi, uzay ortamına atılan kütlelinin SMM koronograf ekipmanı ile gözlemi [Illing and Hundhausen, 1986].

Güneş'in yapısı içten dışa doğru; çekirdek, radyatif bölge, konvektif bölge, fotosfer ve kromosferden meydana gelir. Bunlardan fotosfer, kromosfer ve korona Güneş'in atmosferini oluşturur. Fotosfer Güneş'in ilk atmosfer tabakasıdır ve Güneş'in yüzeyi olarak kabul edilir. Güneş lekeleri fotosferde siyah renkte görünen manyetik alanın yüksek buna karşın sıcaklığın düşük olduğu bölgelerdir. Güneş rüzgârı ise güneşten sürekli olarak dışa doğru meydana gelen plazma akımıdır. Ortalama olarak 400 km/sn hız ile hareket eden güneş rüzgârı yüklü parçacıklardan oluştuğundan hem elektrik alanı hem de güneşin manyetik alanını taşır. Tüm güneş aktiviteleri güneş lekeleri civarında şekillenir çünkü güneş aktivitelerinin kaynağı bu bölgelerdeki zıt yönlü manyetik alanların birleşmeleridir. Bu bölgelerden çok kısa bir zaman içerisinde çok yoğun ve çok hızlı parçacıkların atımı (CME) söz konusudur. CME'ler güneşin negatif yönlü manyetik alanına (IMF B_z) sahip olduklarından dünya manyetosferinde manyetik fırtına, manyetosferik mikro-fırtına ve bunların sonucu olan kutup ışıklarının oluşmasına neden olurlar. Bunların yanı sıra güneş lekelerinin çok olduğu dönemlerde kutuplarda görülen koronal delikler güneşin ekvatoruna doğru genişler. Bu bölgeler açık manyetik alan bölgeleri olup HSS (High Speed Stream) adı verilen yüksek hızlı parçacıklar bu bölgelerden kaynaklanır ve haftalarca sürebilir. Bu olaylar sırasında elektronlar ve protonların hızları ve enerjileri farklı olur. Bu parçacıkların uydu üzerinde neden oldukları etki de enerjilerine göre değişir. Ortalama hızla hareket eden düşük enerjili protonlar ve elektronlar yalnızca yüzey materyallerinde aşınmalara yol açabilecek kapasitede iken ortalama 1200 km/saniye hızla hareket eden protonlar, elektronlar ve ağır iyonlar daha yüksek olan 10 MeV enerji seviyelerine kadar erişebilir. Bu değer uyduların ve elektronik ekipmanların radyasyon zırlarını delebilecek potansiyeldedir. Protonların enerjileri 1 MeV – 1 GeV, elektronların enerjileri 10 keV – 10 MeV, iyonların enerjileri ise 1 MeV – 1 GeV arasında değişkenlik göstermektedir.

Yüzey elektriklenmesi, başlıca düşük enerjili elektronlar tarafından meydana gelmektedir. Çoğunlukla enerjileri 50 keV'a kadar olan elektronlar yüzey elektriklenmesine sebebiyet vermektedir. Düşük enerjili bu elektronlar yüksek yüzey potansiyeli ve yüksek elektrik alan üretimi meydana getirmekte ve bunun sonucunda da yüksek potansiyelden düşük potansiyele doğru elektrostatik deşarj olayı meydana gelebilmektedir. Bu şekilde meydana gelen deşarj olaylarının oranının jeomanyetik aktivite ile ilişkisinin bulunduğu kanıtlanmıştır [Shae ve diğ., 1976]. Uzay ortamındaki elektriklenme durumları kabaca ~10 keV enerji mertebesinde meydana gelen yüzey elektriklenmesi ve ~0.2 MeV enerji mertebesi ve üzerinde meydana gelen dielektrik iç elektriklenme şeklinde ikiye ayrılarak incelenmektedir. Bu çalışmamızda 50 keV altındaki elektronların yüzey elektriklenmesindeki etkileri analiz edilerek incelenmiştir. Çalışmanın sonraki kısımlarında içerik olarak uzay ortamı yüzey elektriklenmesi prensipleri, simülasyon ortamı, uydu modeli, plazma model parametreleri ve simülasyon örnekleri ile birlikte sonuçların yorumlanması ile devam edilmektedir.

¹ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Atmosfer Bilimleri, E-posta: agozutok@itu.edu.tr

² Prof. Dr., Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Müh. Böl., E-posta: zerefsan@itu.edu.tr

YÜZEY ELEKTRİKLENMESİNİN TEMELLERİ

Uydularda yüzey elektriklenmesi iki farklı temel fiziksel mekanizma ile gerçekleşebilmektedir; mutlak ve diferansiyel elektriklenme. Uyduları bir plazma ortamı içerisinde yüzen bir pile benzetebiliriz ve bu pilin kapasitansının oldukça düşük olabileceği göz önünde bulundurulduğu zaman pilin bu plazma ortamında sağlayabileceği denge potansiyeline erişimi milisaniyeler mertebesinde sürebilmektedir. Yalnız ortamda bulunan plazma parçacıklarının yoğunlukları ve enerji dağılımları göz önünde bulundurulduğunda bu dengeye erişimdeki süre yüzey materyal özellikleri doğrultusunda uzayabilmektedir. Uzayda enerji radyasyon yoluyla ve yüklü parçacıkların etkileşimleri ile transfer edilmektedir. Mutlak ve diferansiyel elektriklenmenin temellerinde ise foto-emisyon ve ikincil elektron emisyonu (SEE) gibi olaylar bulunmaktadır. LEO yörüngelerinde (SSO vb.), uydular kuzey enlemleri olan kutup ışıkları bölgelerinden geçerken jeomanyetik fırtınalar kaynaklı yüksek enerjili elektronlarla aynı ortamda bulduklarından elektrik ark oluşum riskleri bulunmaktadır. Diğer bir açıdan da elektronların yüzeye yaptıkları elektron basıncı ($p_e = n_e k_B T_e$) da yüzey elektriklenmesi için belirleyici bir unsurdur, çünkü bu parametre hem elektron yoğunluğuna hem elektron enerjilerine bağlıdır. Yüksek mertebeden elektriklenme durumlarında ortamda mevcut elektronların yoğunluklarının yüksek olduğu gibi enerjilerinin de yüksek olması beklenmektedir [Sarno-Smith ve diğ., 2016].

Foto-emisyon ile Elektriklenme

Dünya yörüngesinde ortalama enerjileri yaklaşık ~ 2 eV olan güneş radyasyonu fotonları uydu yüzeylerinde bulunan materyalin özelliklerine göre, yüzeyi meydana getiren atomlardan elektronların kopartılmasına neden olmaktadır. Bunun sonucunda uydu şasisi pozitif potansiyel ile yüklenmektedir. Bu olayın adı 1887 yılında Hertz tarafından keşfedilen foto-elektrik olaydır [Hertz, 1887]. Bu durum günışığı ile aydınlanan yüzeylerdeki negatif elektriklenmenin mertebesini sınırlayan mekanizmalardan biridir. Uydu günışığında iken gölgelenme konfigürasyonuna göre daha pozitif yüklenme eğilimindedir [Matéo-Vélez ve diğ., 2013].

İkincil Elektron Emisyonu

Yüklü parçacıkların (elektron ve iyonların) yüzeylere çarpıp toplanması gibi fiziksel mekanizmalar yüzeyden ikincil elektron emisyonuna neden olmaktadır, parçacığın yüzey materyalindeki atomlardan sökebileceği elektronların oranı yüzeydeki materyalin özelliklerine, parçacığın yüzey normaliyle yaptığı çarpışma açısına ve gelen parçacığın enerji seviyesine bağlıdır. Toplanan parçacıklar yüzeyde oluşan elektrik akımları şeklinde kendini gösterebilir, zira bunun temel nedeni negatif yüklü elektronların ortalama hızlarının iyonlarınkinden daha yüksek olmasıdır ve uydu gölgede iken daha mutlak negatif potansiyelle yüklenme eğilimindedir [Matéo-Vélez ve diğ., 2013].

Yüzeyden Saçılan Elektronlar

Materyal plazma ortamında denge potansiyeline eriştikten sonra yüzeye gelen parçacığın enerjisi eşik değerinin altında olduğunda elektronlar bariyer potansiyeli tarafından geri çevrilmektedir veya yüzey tarafından herhangi bir atomik etkileşim meydana gelmeden yansıtılabilir.

Mutlak (Absolute) Elektriklenme

Mutlak elektriklenme, pozitif ve negatif yüklü plazma ortamının uydu üzerinde bulunan yüzey materyalleri ile olan etkileşimlerinden meydana gelen yüzey potansiyelindeki değişimlerdir. Uydu üzerindeki izolasyon malzemelerinin dağılımları ve oranları mutlak elektriklenme mertebesi ile ilişkilendirilebilir. Örneğin; uydu yüzey alanının çoğunluğu güneş hücresiyle kaplı uydular günışığı durumlarında daha düşük yüzey mutlak potansiyeline yakınsamaktadır (foto-elektrik olay).

Diferansiyel (Differential) Elektriklenme

Uydu yüzeylerinde bulunan farklı özelliklerdeki materyallerin (izolasyon malzemesi, topraklama, vb.) farklı elektriksel özelliklere sahip oldukları göz önünde bulundurulduğu zaman elektriklenme eğilimleri birbirinden farklı olduğu görülebilmektedir. Uydu üzerinde farklı konumlarda bulunan aynı yüzey materyalleri buldukları ortam koşullarına göre (gölgede kalan yalıtım yüzeyi vs. günışığında kalan yalıtım malzemesi gibi – buradaki etken foto-emisyon örneği olabilir) farklı yüzey potansiyeli

¹ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Atmosfer Bilimleri, E-posta: agozutok@itu.edu.tr

² Prof. Dr., Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Müh. Böl., E-posta: zerefsan@itu.edu.tr

değerlerine yakınsayabilir. Bir yüzey, diğer yüzeylerle lokal olarak bağlantılı ise aralarında diferansiyel elektriklenme kaynaklı şarj – deşarj meydana gelebilir.

SİMÜLASYON ORTAMI

Önceki bölümde anlatılan bu etkilerin incelenmesi adına yüzey elektriklenmesi problemlerinin çözülmesinde üç boyutlu (3D) simülasyon araçlarının uydu kavramsal tasarım süreçlerinde uygulamalı ve iteratif şekilde kullanılması gerekmektedir.

SPIS 6.1.0

Bu çalışmada yüzey elektriklenmesini incelemek için SPIS (Space Plasma Interaction Software) programı kullanılmıştır. Programın 23 Haziran 2021 tarihli en güncel sürümü olan 6.1.0 versiyonu tercih edilmiştir. SPIS programının pek çok uzay ortamı ve elektriklenme analiz yönergeleri tarafından tercih edilmesinin temel nedenleri farklı ortam koşullarının kolayca modellenmesi, detaylı üç boyutlu uydu modellerinin yazılıma entegre edilebilmesi, uydularda kullanılan yüzey materyal veri tabanının zengin olmasıdır.

Haberleşme Uydusu Modeli ve Referansı

GEO yörüngedeki yüksek kapasiteli bir haberleşme uydusunun 3D yapısal indirgenmiş modeli GMSH 2.8.5 programıyla “.GML” ve “.GEO” dosya formatlarında ve tipik bir haberleşme uydusu boyutlandırmasına sadık kalınarak hazırlanmıştır. Modellenen haberleşme uydusu üç eksenli yönelim kontrolüne sahiptir, $\pm Y$ doğrultusu boyunca kuzey ve güneyde 5 adet ve toplamda 70 m^2 ’lik olmakla birlikte yüzeyinde (+Z normalinde) triple junction (Cerium Doped MgF2 coated) güneş hücrelerinin bulunduğu güneş paneli kanatları, $\pm X$ doğrultusu boyunca görev yükü reflektör antenleri bulunmaktadır. Uydu gövdesi yapısal panel yüzeyleri siyah ve sarı kapton çok katmanlı yalıtım battaniyesi (ÇKYB) ile yüzeyel ve elektriksel olarak kaplanmıştır. Güneş panellerinin – Z normal hem sağlamlık hem hafiflik için karbon fiberle güçlendirilmiş polimer (CFRP) ile tanımlanmıştır. Haberleşme uydusunun $\pm Y$ yapısal panelleri ısı kontrol amaçlı optik yüzey yansıtıcıları (OSR) ile kaplıdır. Antenlerin Dünya’ya bakan +Z yüzeyleri elektro-statik ve termo-elastik açıdan hedefleme doğruluğunu arttırmak için Kapton-Germanyum yalıtım battaniyesi ile kaplanmıştır, yine antenlerin uzaya bakan (anti-earth) –Z yüzeyleri ve kenarlarına siyah ÇKYB ile yalıtım uygulanmıştır. Güneş paneli ve anten modelinde ince panel metodu kullanılmamış ve panellerin boyutlandırmasında yüzeyine kenar kalınlığı eklenerek tanımlama yapılmıştır.

Tasarımı yapılan uydu modelinin hem simülasyon zamanından tasarruf hem de simülasyon ortamının doğruluğunu arttırmak için NETGEN algoritması ile optimize edilen ağ ve çözüm ortamı özellikleri aşağıdaki gibidir. Ortalama hücre kalitesi büyük uydu modeli için yeterli bir değer olan 0.7496574 olarak hesaplanmaktadır (elektriklenme simülasyonu için önerilen mesh kalitesi > 0.67).

of tetrahedra: 219838,

of faces: 451309,

of edges: 274205,

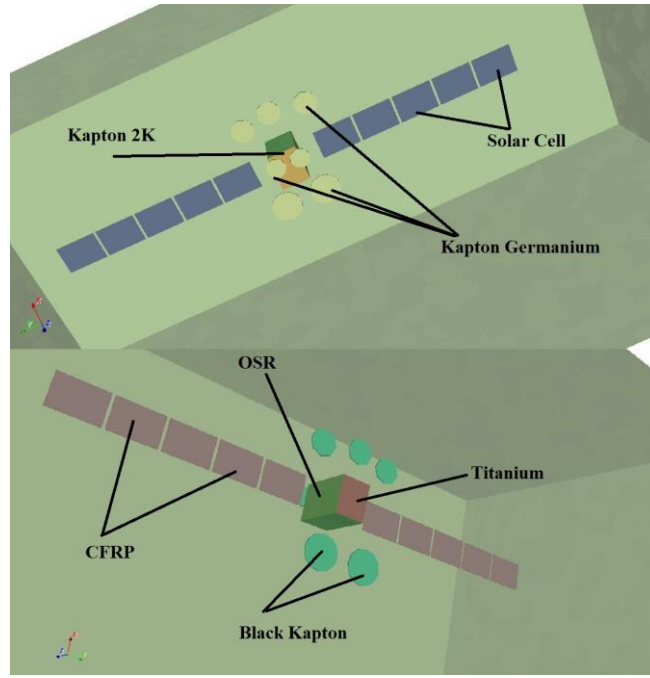
of vertices: 42753.

Uydunun topraklama noktası platform tarafı –Z yüzeyi olarak belirlenmiş ve Titanyum materyaliyle tanımlanmıştır. Tipik bir haberleşme uydusu ele alınarak uydunun kapasitansı (C_{sat}) 1000 pF (10^{-8} F) olarak alınmıştır. Tanımlanan yüzey materyallerinin tamamı SPIS 6.1’de bulunan materyal veri tabanından seçilmiştir. Uydu yüzeyleri fiziksel olarak Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu görselde ve uydu modelinde uydu yüzey elemanları tamamen birbirleri ile fiziksel olarak temas halinde olmaları da SPIS elektrik devre tanımlama ortamında elektriksel olarak tüm yüzey elemanları topraklama hattı olarak tanımlanan anti-earth -Z yüzeyine elektriksel olarak rezistans ile bağlanmıştır. Yüzeylerin erişecekleri mutlak potansiyel değerleri Titanyum ile tanımlanan bu yüzeyde oluşan mutlak elektrik potansiyelinden çıkartılarak yüzeylerin diferansiyel potansiyel değerleri elde edilmiştir.

Uydunun simülasyon ortamı koordinat eksen takımı local vertical – local horizontal (LVLH) eksen takımı şeklinde tanımlanmıştır. Bu eksen takımında +X eksen yörüngenin konum vektörünü, +Z eksen yörüngede Dünya’nın merkezine bakmaktadır, +Y eksen doğrultusu ise yörünge düzlemine dik olacak şekilde açılma momentum vektörü ile ters yönde konumlandırılmıştır ve bu üç vektör birbiri ile ortogondur. Şekil 4’teki görselde LVLH ve uydu – güneş konfigürasyonu görülebilmektedir.

¹ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Atmosfer Bilimleri, E-posta: agozutok@itu.edu.tr

² Prof. Dr., Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Müh. Böl., E-posta: zerefsan@itu.edu.tr



Şekil 2: Uydu 3D geometrisi ile yüzey materyallerine +Z (ön) ve -Z'ten (arkadan) bakış.

Uydu Yüzeyleri Materyal Parametreleri

Seçilen uydu yüzey parametreleri için atanan yüzey materyallerinin kütsel ve elektriksel özellikleri tabloda belirtildiği gibidir. Şekil 2'de uydunun uçuş konfigürasyonu ve yüzeylere atanan materyal türleri görülebilmektedir. Tablo 1'de verilen elektriksel parametreler 3D uydu modeli yüzeylerinde uygulanan materyallerin bazı yapısal ve elektriksel özelliklerini özetlemektedir. Bulk conductivity ve surface resistivity parametrelerinde değerlerin -1 olduğu yüzeyler iletken (conductor) materyallerdir. Diğer yüzeylerin (güneş paneli, OSR) iletkenlik performansları bu materyallere göre daha düşüktür.

Tablo 1: SPIS ile oluşturulan yüzey materyallerinin elektriksel özellikleri.

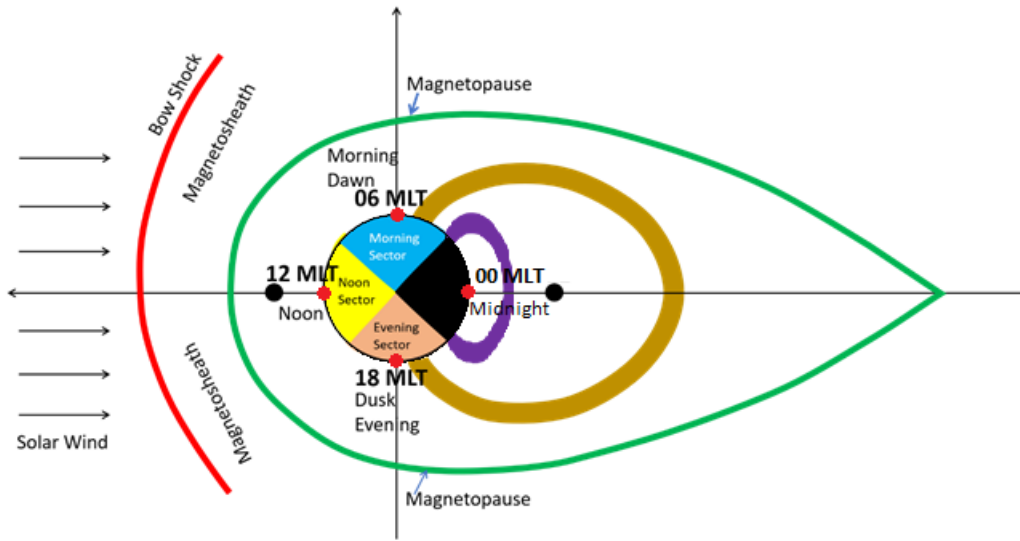
Unit	Parameter	Material				Kapton	Kapton	Kapton
		Titanium	Solar Cell	CFRP	OSR	(Black)	(Germanium)	(Yellow)
(Ohm.m) ⁻¹	Bulk Conductivity	-1	1x10 ⁻¹⁷	-1	1x10 ⁻¹⁷	-1	-1	1x10 ⁻¹⁶
kg/m ³	Material Density	4510	2000	1000	2000	1201	1200	1201
keV	PEE	0.28	1	0.3	0.5	0.15	0.4	0.15
keV	IPE	230	230	135	140	140	140	140
Ohm ²	Surface Resistivity	-1	1x10 ¹⁹	-1	1x10 ¹⁹	-1	-1	1x10 ¹⁶
A/m ²	PEY	4x10 ⁻⁵	2x10 ⁻⁵	7.2x10 ⁻⁶	2x10 ⁻⁵	5x10 ⁻⁶	2x10 ⁻⁵	2x10 ⁻⁵
Ångström	RPR2	220	156.1	300	183.1	312.1	400	312.1
Volt	MAP	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000
Ångström	RPR1	154	77.5	110	116.3	71.48	80	71.48
NA	ATN	22	10	6.34	10	5	6	5
NA	MSEY	0.9	5.8	0.7	3.3	2.1	1	2.1
Volt	MPD	11000	2660	11000	2660	1600	2000	1600
NA	RCP	1	1	1	1	1	1	1
keV	SEY	0.244	0.244	0.413	0.455	0.455	0.46	0.455
NA	RPN1	0.8	0.45	1.9	0.81	0.6	2	0.6
(Ohm.m) ⁻¹	RCC	1x10 ⁻¹³	0	1x10 ⁻¹³	0	0	1x10 ⁻¹¹	0
NA	RPN2	1.76	1.73	1.04	1.86	1.77	1.5	1.77
NA	RDC	1	3.8	1	4	3.5	1	3.5
m	DMT	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001

¹ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Atmosfer Bilimleri, E-posta: agozutok@itu.edu.tr

² Prof. Dr., Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Müh. Böl., E-posta: zerefsan@itu.edu.tr

Uzay Ortamı Parametreleri

Haberleşme uydusu konfigürasyonu Güneş'e göre "00" Manyetik Yerel Saat'e (MLT) göre oluşturulmuştur. Bu koşullar altındayken uydu hem günışığı hem gölgelenme konfigürasyonlarında gerçeğe uygun ortam koşullarında ve simülasyon parametreleriyle modellenenmektedir. Bu zaman dilimi uydunun yerel gece yarısı veya gece yarısı sektörü şeklinde tanımlanmaktadır ve GEO için elektriklenme açısından riskli bir zaman dilimidir çünkü manyetik fırtınaların oluşma bölgesinde (plasma sheet) yer almakta olup uyduların yüksek hızlı hareket eden elektron ve iyonlara maruz kalma potansiyelinin en yüksek olduğu bölgedir. Şekil 3'de MLT'ye göre uydu konumları sektör adlandırmalarını göstermektedir. Şekilde Güneş sol tarafta olup güneş rüzgârı Dünya'ya doğru ilerlerken resmedilmiştir. Kırmızı iri noktalar MLT'yi, yani Manyetik Yerel Saati, kırmızı, mavi, sarı ve turuncu renkli bölgeler ise bu yerel saate ait manyetik sektörleri göstermektedir. Büyük siyah noktalar ise 6.6 Re'deki GEO uyduyu simgelemektedir. Yeşil çizgi manyetopozu, kırmızı çizgi şok tabakasını, mor renk iç radyasyon kuşağını, taba rengi ise dış radyasyon kuşağını göstermektedir. Yeşil çizginin iç tarafı tümüyle manyetosfer bölgesidir. Gündüz tarafında manyetopoz ortalama güneş rüzgârı şartları altında 10 Re'de yer almaktadır. Ancak güneş aktiviteleri arttığında manyetopoz 3 Re'e kadar Dünyaya doğru yaklaşmakta GEO uydusu güneş rüzgârı plazması içinde bırakılmaktadır.



Şekil 3: MLT ve sektör tanımlamaları ve GEO uydunun etrafındaki uzay ortamı.

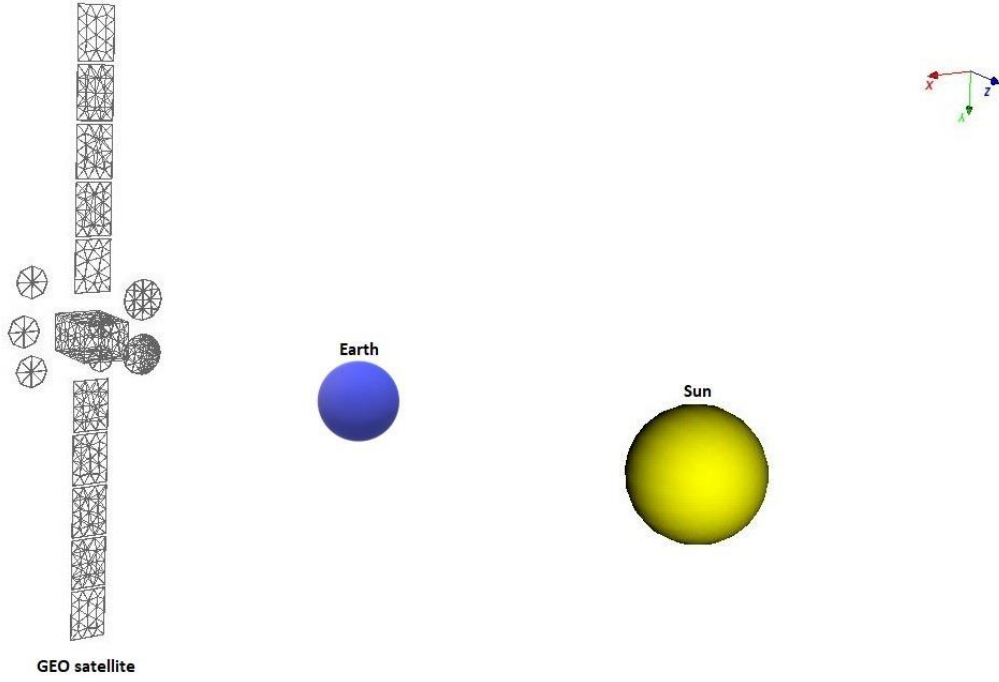
GEO yörünge için manyetik alan değeri, uydunun parçacıklara göre olan yörünge hızı ve yüklü parçacıkların uyduya göre olan drift hızları ihmal edilmiştir. Uydu elektriklenmesi hem güneş ışığı altında hem de gölgelenme durumlarında iki farklı senaryo ie, farklı ortam plazma parametreleri ile test edilmiştir. Güneş ışığı altındayken foto-emisyon tag'i açılarak "1" konumuna getirilmiş, gölgelenme (eclipse) senaryosunda ise bu tag kapatılarak foto-emisyon olayı durdurulmuştur. Güneş'ten gelen fotonların ortalama enerjileri 2 eV olarak tanımlanmıştır. Simülasyonlardaki denge potansiyeline erişim süresi 2000 s (33 dk.) olarak tanımlanmıştır, simülasyonların tamamı bu süre içerisinde stabil bir yüzey potansiyeli çözümüne yakınsamıştır [Nakamura ve diğ., 2018].

Foto-emisyon olan ve olmayan koşullar için öncelikle ortamda bulunan plazma yoğunluğu sabit tutularak plazma enerjileri parametrize edilmiştir. Sabit elektron ve iyon (H^+) plazma popülasyonlarının ele alındığı simülasyon senaryolarında parçacıkların yoğunlukları günışığı koşulları altında 1.5 \#/cc (\#/cm^3), gölgelenme koşulları altında ise 1 \#/cc olarak tanımlanmıştır. Bu senaryolarda ise elektronların enerjileri günışığı senaryolarında 20-25-30-35-40 keV enerji seviyelerinde tanımlanırken, gölgelenme senaryolarında 10-15-20-25-30 keV elektron enerjileri ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda H^+ iyonu popülasyonlarının kinetik enerjileri $2 \times T_e$ elektron sıcaklığının iki katı şeklinde tanımlanmıştır ($T_i = 2 \times T_e$).

Ortamda bulunan plazma popülasyonlarının istatistiksel olarak dağılımları elektronlar için "Global Maxwellian" (tek popülasyon), H^+ iyonları için ise Liouville teoreminin uygulandığı "Back Tracking" (tek popülasyon) dağılımı şeklinde tanımlanmıştır [Sarrailh ve diğ., 2015].

¹ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Atmosfer Bilimleri, E-posta: agozutok@itu.edu.tr

² Prof. Dr., Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Müh. Böl., E-posta: zerefsan@itu.edu.tr



Şekil 4: Haberleşme uydusu için local vertical – local horizontal (LVLH) koordinat eksen takımı. Şekilde, X eksenini yörünge konum vektörü, Z eksenini 00 MLT'da Dünya'ya doğru, Y eksenini ise açısal momentum vektörüne (h) ters doğrultudadır. Y eksenini için + vektörü uydu düzleminde güney doğrultusundadır.

ANALİZ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Çalışmanın bu kısmında elde edilen simülasyon sonuçlarının karşılaştırmalı olarak incelenmesi, görselleştirilmesi ve sonuçların irdelenmesi ele alınmaktadır. Örnek olarak gölgelenme ve günışığı konfigürasyonları için simülasyon çıktıları görselleştirilmiş ve aşağıdaki şekillerde sunulmuştur. Seryum (Ce) katkılı MgF2 kaplamalı güneş paneli yüzeyi için kritik denilebilecek diferansiyel potansiyel eşik limit değeri yaklaşık < 2 kV olarak belirlenmektedir. Bu eşik değerinin üzerindeki diferansiyel potansiyel senaryolarında güneş paneli yüzeyinde bulunan coverglass çevresinde elektrik ark oluşumuna yetecek bir yük birikiminin meydana gelme olasılığı yüksektir [Ferguson ve diğ., 2017]. Yüksek diferansiyel potansiyel farkı oluşan elektronik devrelerde ikincil arklar da meydana gelebilmektedir [Cho ve diğ., 2005]. Elektriksel nod'larda zamana bağlı örnek yüzey mutlak ve diferansiyel potansiyel evrim grafikleri Şekil 5'de verilmiştir. Grafikteki simülasyon konfigürasyonu foto-emisyon bayrağının açık konumda olduğu durumda elde edilmektedir. Mutlak potansiyel, ortamdaki yüksek enerji düzeyinden ve elektronların yoğunluğundan dolayı negatiftir. Değerler aynı ortam koşullarında gerçekleştirilen gölgelenme (foto-emisyon kapalı) simülasyonunda daha yüksek gözlenmiştir zira foto-emisyon etkileri mevcuttur. Mutlak yüzey potansiyeli değeri direkt simülasyon çıktıları ile elde edilmekteyken diferansiyel yüzey potansiyeli simülasyon çıktıları olan elektriksel nod'ların yüzey mutlak potansiyel değerleri ile aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır.

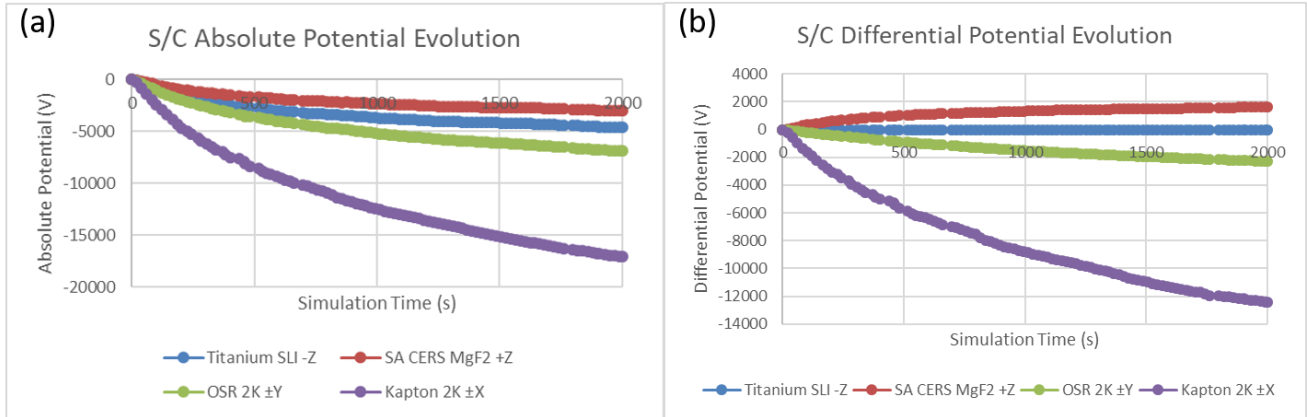
$$\Delta V_{\text{differential}} = V_{\text{surface potential}} - V_{\text{ground potential}} \quad (1)$$

Ortamın plazma popülasyon yoğunluklarının sabit tutulduğu (gölgelenme için 1 #/cc, günışığı için 1.5 #/cc), elektron yoğunluklarının değiştirildiği simülasyon sonuçlarında, gölgelenme koşulları altında (foto-iyonizasyon etkilerinin ihmal edildiği) yüzey mutlak potansiyeli ve diferansiyel potansiyelin elektron enerjileri ile değişimleri Şekil 6a ve 6b'de görülmektedir. Şekil 8a'da görüldüğü gibi mutlak potansiyel değerleri elektron enerjileri ile düzenli bir şekilde azalmaktadır ve curve-fitting ile elde edilen yüzey mutlak potansiyel değişim değerleri $y = 0.1043x^3 - 12.985x^2 - 93.337x - 776.63$ denklemi ile modellenmektedir. Güneş paneli için elde edilen diferansiyel potansiyel grafiği de (Şekil 8b) doğrusal olmayan bir artış göstermekte ve $y = -0.4684x^3 + 25.147x^2 - 283.76x + 2059.9$

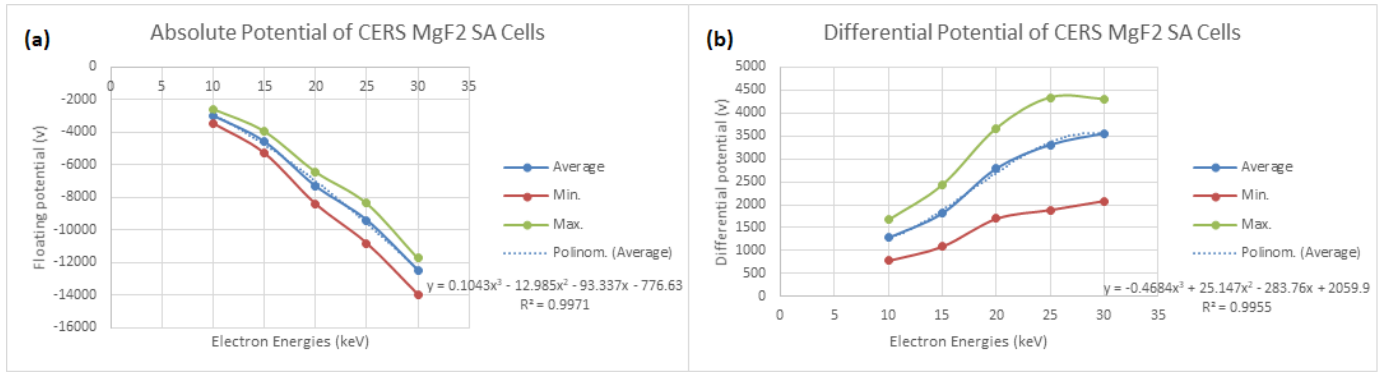
¹ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Atmosfer Bilimleri, E-posta: agozutok@itu.edu.tr

² Prof. Dr., Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Müh. Böl., E-posta: zerefsan@itu.edu.tr

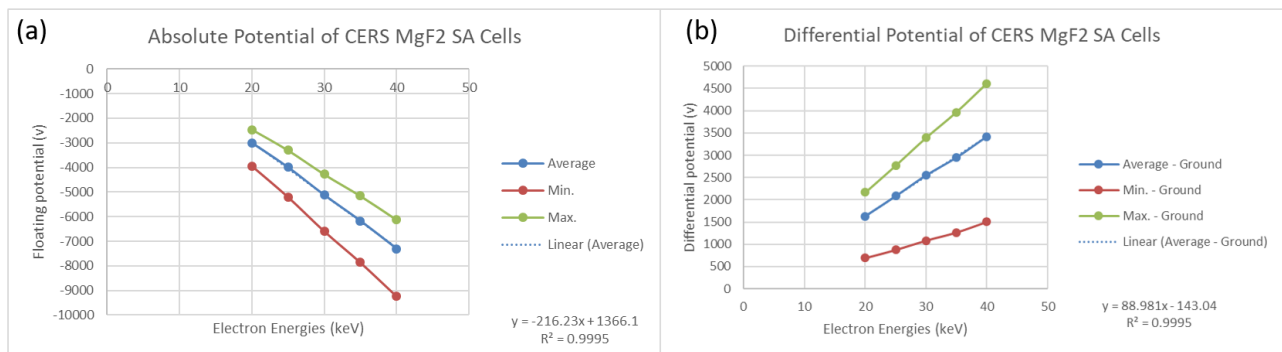
denklemleri ile modellenmektedir. Gölgeleme koşulları altında 16 keV elektron enerjisi ve üzeri güneş paneli için kritik eşik değeri olarak belirlenmektedir, bu değerin üzerindeki enerji dağılımları ortalama 2 kV'luk diferansiyel yüzey potansiyeli ve ark riskini artırmaktadır.



Şekil 5: Güneşli konfigürasyonunda 20 keV'lük elektron enerjisi altında elektrik nod'larının zamana bağlı (a) mutlak potansiyel ve (b) diferansiyel potansiyel evrimi ($\rho_e = 1.5 \text{ \#}/\text{cc}$).



Şekil 6: Gölgeleme konfigürasyonunda (foto-emisyon kapalı) güneş hücrelerinde meydana gelen (a) mutlak ve (b) diferansiyel yüzey potansiyelinin elektron ve iyon enerjileri değişimiyle olan ilişkisi.



Şekil 7: Güneşli konfigürasyonunda (foto-emisyon açık) güneş hücrelerinde meydana gelen (a) mutlak ve (b) diferansiyel yüzey potansiyelinin elektron ve iyon enerjileri değişimiyle olan ilişkisi.

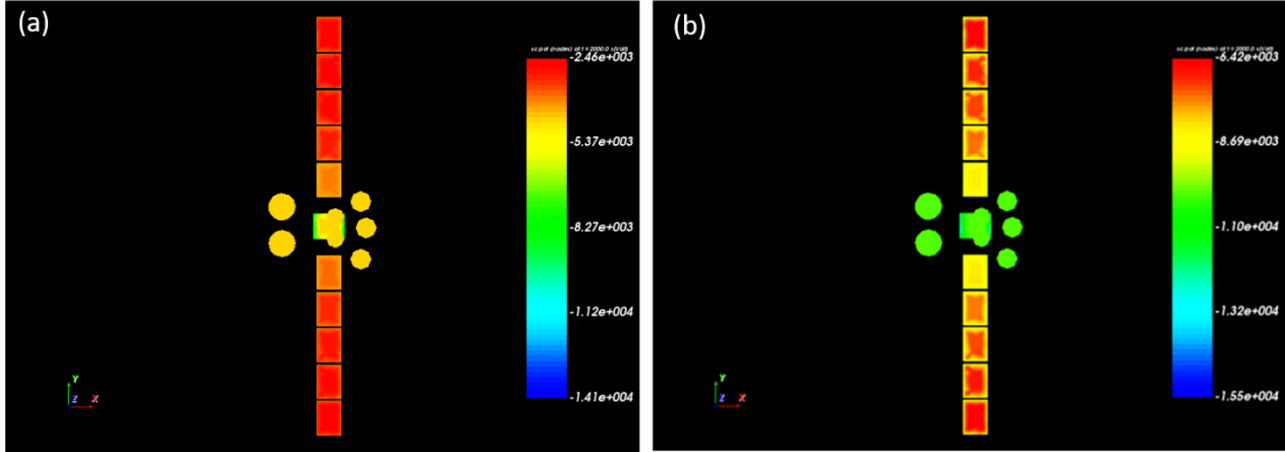
Sabit elektron ve proton yoğunluğu ($1.5 \text{ \#}/\text{cc}$) durumunda, güneşli konfigürasyonunda ortalama yüzey mutlak potansiyeli değişen elektron enerjileri ile doğrusal bir davranış sergilemektedir (Şekil 9a), $y = -216.23x + 1366.1$ doğrusu ile güneş paneli yüzey potansiyeli lineer şekilde modellenmektedir. Diferansiyel yüzey potansiyeli 25 keV elektron enerjisi seviyeleri için 2 kV'luk eşik değeri aşarak güneş paneli kanadında oluşabilecek ark oluşum riskini artırmaktadır. Şekil 7b'de artan elektron enerjisi ile doğrusal bir artış gösteren diferansiyel potansiyeldeki değişim $y = 88.981x$

¹ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Atmosfer Bilimleri, E-posta: agozutok@itu.edu.tr

² Prof. Dr., Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Müh. Böl., E-posta: zerefsan@itu.edu.tr

– 143.04 doğrusu ile tahmin edilebilmektedir. Doğrusal bir tahmin ile ortalama enerjileri 1.6 keV'luk elektronlar yüzeyde diferansiyel elektriklenme farkı yaratabilecek potansiyeldedir ($\Delta V > 0$ V) çıkarımı yapılabilmektedir. Elde edilen sonuç yüzey mutlak ve diferansiyel potansiyel eğrileri / doğruları analitik çözümleri simülasyon sonucunda erişilen güneş paneli (SA CERS MgF2 coverglass) ortalama değerleri (sonuç grafiklerindeki mavi renkli seri) kabul edilerek oluşturulmuştur.

Şekil 8'de günışığı ve tutulma konfigürasyonları arasındaki potansiyel farkı daha net bir şekilde görselleştirebilmek için aynı iki ortam koşulu ($1.5 \text{ \#}/\text{cc}$ & $T_e = 20 \text{ keV}$) için elde edilen simülasyon sonucu görülmektedir. Günışığı durumunda yüzey tutulmaya göre daha pozitif potansiyele sahiptir (Şekil 8a için yaklaşık -2460 V). Tutulma durumunda foto-emisyon bayrağı kapalı durumda olduğundan yüzey potansiyelini negatif yönde sınırlayıcı bir mekanizma olmadığından görülen en yüksek yüzey potansiyeli daha düşüktür (Şekil 8b güneş paneli için yaklaşık -6420 V).



Şekil 8: (a) Günışığı (sunlit) ve (b) gölgelenme (eclipse) konfigürasyonunda sabit elektron ve iyon yoğunluğu ($1.5 \text{ \#}/\text{cc}$) ve elektron enerjisi ($T_e = 20 \text{ keV}$) koşullarında 2000 sn'lik simülasyon sonucunda materyallerinin yüzey potansiyelinin eriştiği mutlak elektriklenme.

Şekil 8'de görselde gölgede ve günışığında gösterilen simülasyon konfigürasyonlarından güneş panelleri kanatlarının uydu platformunun gövdesine yakın olan yüzeyleri daha negatif bir potansiyele sahipken uyduya uzak olan kanat kısımlarının daha yüksek yüzey elektrik potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Aslında bu durum uydu platformu tarafındaki yüzeylerde bulunan ve tamamıyla iletken olan siyah kapton, CFRP, Titanyum ve anten yüzeylerinde bulunan kapton germanyum malzemelerinin yüzey plazma potansiyellerinin günışığı ve gölge durumlarında düşük mertebede kalmasından kaynaklanmaktadır. Bunun sonucunda listelenen malzemelere yakın olan yüzeyler (örneğin; kuzey/güney güneş paneli kanadının platforma yakın olan birinci kısımları) bu yüzeylere yakın potansiyellere sahiptir. Güneş paneli için bu değer sonuç eğrilerinde (Şekil 6 & 7) gösterilen kırmızı eğri ile tanımlanmaktadır. Sonuç olarak bu yüzeylerde diferansiyel elektriklenme ve elektrik ark oluşumunun diğer güneş paneli yüzey kısımlarına göre daha düşük olasılıkta olduğu görülmektedir. Güneş panelinde elektrik ark riski de platformdan uzaklaştıkça yükselmektedir zira bu bölgelerdeki yüzey mutlak potansiyeli ve topraklama nod'una göre olan potansiyel fark değeri platforma yakın olan güneş paneli kısmından daha yüksektir, bu nedenle kanat uçlarında diferansiyel potansiyel değeri yükselmektedir ve ESD riski artmaktadır.

SONUÇLAR

GEO yörüngede yüksek kapasiteli bir haberleşme uydusunun yüzey elektriklenme simülasyonları farklı plazma ortam parametreleri (elektron – iyon enerji seviyeleri) ile gölgelenme ve günışığı konfigürasyonları altında analiz edilmiştir. Elde edilen model çıktılarından görüldüğü üzere mutlak ve diferansiyel elektriklenme ortamda bulunan plazma popülasyonlarının enerji seviyelerine, yoğunluklarına, materyallerin yüzey alanlarına, gölgelenme ve güneşlenme konfigürasyonlarına bağlıdır. Elektriklenme ve yüzey potansiyelindeki evrim zamana bağlıdır, denge potansiyeline erişim hızı, mutlak ve diferansiyel elektriklenme mertebeleri yüzey materyallerinin elektriksel özellikleri ile doğrudan ilişkili durumdadır. Araştırmanın ilerideki aşamalarında uydu modeli daha gerçekçi yüzey modeliyle güncellenerek simülasyonların doğruluk oranları artırılacaktır.

¹ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Atmosfer Bilimleri, E-posta: agozutok@itu.edu.tr

² Prof. Dr., Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Müh. Böl., E-posta: zerefsan@itu.edu.tr

Kaynaklar

- Ferguson, Dale & Hoffman, Ryan & Engelhart, Daniel & Plis, Elena. (2017), “*Voltage Threshold and Power Degradation Rate for GPS Solar Array Arcing*”, IEEE Transactions on Plasma Science. PP. 1-4. 10.1109/TPS.2017.2694387.
- Hertz, H. (1887). “*On the photoelectric effect*”. Ann Phys, 31, 983-1000.
- Lai, Shu T. and Cahoy K, “*Spacecraft Charging*”, in Encyclopedia of Plasma Technology ed. J. Leon Shohet (Boca Raton: CRC Press, 12 Dec 2016), accessed 06 Eyl 2022, Routledge Handbooks Online.
- Matéo-Vélez, J-C., (2013)., “*User Manual, Annex 1 – Spacecraft surface charging in GEO/MEO*”, ONERA.
- Mengu Cho, Shirou Kawakita, Masao Nakamura, Masato Takahashi, Tetsuo Sato, and Yukishige Nozaki, (2005), “*Number of Arcs Estimated on Solar Array of a Geostationary Satellite*”, Journal of Spacecraft and Rockets 42:4, 740-748.
- Nakamura, Masao ve diğ., (2018), “*Assessment of worst GEO plasma environmental models for spacecraft surface charging by SPIS*”, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan 16.6: 556-560.
- P. Sarrailh ve diğ., (2015), “*SPIS 5: New Modeling Capabilities and Methods for Scientific Missions*”, in IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 43, no. 9, pp. 2789-2798, Sept. 2015, doi: 10.1109/TPS.2015.2445384.
- Sarno-Smith, L. K., Larsen, B. A., Skoug, R. M., Liemohn, M. W., Breneman, A., Wygant, J. R., and Thomsen, M. F. (2016), “*Spacecraft surface charging within geosynchronous orbit observed by the Van Allen Probes*”, Space Weather, 14, 151– 164, doi:10.1002/2015SW001345.
- Shae,R.R., Nanevicz, J.E., Adamo, R.C., (1976). “*Observations of electrical discharges caused by differential satellite-charging*”, from the AIAA Symposium on "Spacecraft Charging by Magnetospheric Plasmas held in Washington, D.C., June 1975, Progress in Astronautics and Aeronautics, vol. 47, pp. 61-76, MIT Press, 1976

¹ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Atmosfer Bilimleri, E-posta: agozutok@itu.edu.tr

² Prof. Dr., Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Meteoroloji Müh. Böl., E-posta: zerefsan@itu.edu.tr