UHUK-2020-061

HABERLEŞME UYDULARINDA KULLANILAN ELEKTRİK İTKİ SİSTEMİNİN GÜÇ SİSTEMİ KÜTLE DEĞIŞİMİNE ETKİSINİN İNCELENMESİ

Şükrü Can ÖZER¹ TÜRKSAT, Ankara Selman DEMİREL² TÜRKSAT, Ankara

ÖZET

Gelişen teknoloji ile birlikte, operatör firmalar yere durağan yörüngede görev yapan haberleşme uyduları için, kimyasal itki sistemi kullanılmasının yerine elektrikli itki sistemi kullanılmasını tercih etmektedir. Çünkü elektrikli itki sistemi ile birlikte uyduda kütle kazancı sağlanarak, faydalı yük kabiliyetinin artırılmasını ve fırlatıcı maliyetlerinin düşürülmesi amaçlanmaktadır. Fakat elektrikli itki kullanan uydular faydalı yük kütle kazancının yanında, bazı alt sistemler için kullanılan ekipman sayı ve boyutlarının artmasına bağlı olarak kütle artışı oluşturabilmekte, ayrıca ekipmanların yerleşimi için daha geniş hacimlere ihtiyaç duyabilmektedir. Değişikliklerden en çok etkilenen alt sistemlerden birisi de uydu güç sistemidir. Güç sistemi kütlesini incelemek adına bu çalışma kapsamında, aynı faydalı yüke sahip kimyasal itki sistemi kullanan uydu ile elektrikli itki sistemi kullanan uydu arasında güç sistemi boyutlandırılması yapılmıştır. Boyutlandırma bilgileri kullanılarak, iki uydu modeli arasında kütle kıyaslaması incelenmiştir.

Kısaltmalar

AOCS :Attiude and Orbit Control System (Yörünge yönelim ve Kontrol Sistemi)

- AWG : American Wire Gauge (Amerikan Tel Ölçü Sistemi)
- BOL :Beginning of Life (Misyon başlangıcı)
- DOD :Depth of Discharge (Deşarj Derinliği)
- DTMA :Deployable Thruster Mechanical Arm (Açılabilir İtki Modül Yapısı)
- ECSS : European Cooperation for Space Standardization
- EİKU :Elektrikli İtki Kullanan Uydu
- EOL :End of Life (Misyon Sonu)
- EOR :Electric Orbit Raising (Yörünge yükseltme manevrası)
- KİKU :Kimyasal İtki Kullanan Uydu
- PPS :Plasmic Propulsion System (Plazma İtici Altsistemi)
- TT&C :Telemetry and Telecommand System (Uzölçüm ve Uzkomut Sistemi)

¹Müh, Teknik Personel, Uydu Programları Direktörlüğü, scozer@turksat.com.tr

²Dr. Müh, Direktör, Uydu Programları Direktörlüğü, sdemirel@turksat.com.tr

GİRİŞ

Haberleşme uyduları için kütle, uydu fırlatıcı maliyetlerini ve manevra performansını etkileyen önemli bir dizayn parametresidir. Klasik kimyasal itki kullanan uydularda kütle bütçesinin büyük bölümünü yakıt kütlesi oluşturmaktadır. Fakat elektrikli itki sisteminin gelişmesiyle birlikte uydu kütlesinde kazançlar sağlanmaya başlanarak, uydu faydalı yük kapasitesi artırılmakta ve fırlatıcı maliyetleri azalmaktadır. Aradaki farkı daha iyi anlayabilmek adına, aynı görev yüküne sahip iki haberleşme uydusunun kütle bütçesi mertebesi bakımından karşılaştırması Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1:Kimyasal ve Elektrikli İtki Kütle Bakımından Karşılaştırması [Patela, Reddyp Ahmadc, Satheeshd ve Re, 2018]

Şekil 1'de gösterildiği gibi aynı görev yüküne sahip iki uydu arasında yakıt kütlesinden kaynaklı büyük fark oluşmuştur. Yakıt kütlesinin yanında uydu servis modülündeki kütle artışı da gözlemlenmektedir. Bunun nedeni elektrikli itki sisteminin karmaşık yapı oluşturması ve güç ihtiyacının artmasından kaynaklı kullanılan ekipmanların artmasıdır. Bu durum diğer altsistem ekipmanlarını da etkilemektedir. Bu yüzden uyduların servis modülünde kütle artışı olmaktadır. Klasik bir haberleşme uydusunun alt sistem bazında kütle bütçesi dağılımı ise Tablo 1'de gösterilmiştir.

Kuru Kütle Bütçesi					
Alt-Sistem	3 Eksende Stabil Uydu (%)				
Yapısal Sistem	18				
İtki Sistemi	12				
Güç Sistemi	23				
AOCS	7				
TT&C	4				
Isıl Kontrol Sistemi	4				
Faydalı Yük	28				
Kablolama	4				
Toplam	100				

Tablo 1:Alt-Sistem Kütle Dağılımı [Wijker, 2008]

Tablo 1'de görüldüğü üzere, uydu güç sistemi uydu kuru kütlesi için faydalı yükten sonra en fazla kütleye sahip alt sistemdir [Wijker, 2008]. Elektrikli itki ile birlikte uzun süren transfer yörünge süreleri, itki sistemi güç ihtiyacı, kablolama gibi parametreler güç sistemini karmaşıklaştırmıştır. Bu durum uydu güç sistemi için kullanılan ekipmanların değişmesine, sayılarının artmasına yol açarak kullanılacak kütle ve maliyetin artmasına sebep olmaktadır. Kütle bakımından değişimi incelemek adına, bu çalışmada aynı faydalı yüke sahip klasik kimyasal itki sistemine sahip bir uydu ile tam elektrik itki sistemine sahip uydunun güç sisteminin kütle bakımından karşılaştırması yapılmıştır. Yapılan analizlerde misyonun başlangıcından sonuna kadar uzay çevre koşullarından dolayı ekipmanlardaki yaşlanmalar hesaba katılmıştır.

YÖNTEM

Güç Sistemi Boyutlandırılması

Uydu güç sisteminin kütlesinin yaklaşık %80'ini güneş panelleri ve piller oluşturmaktadır. Geriye kalan kısım ise kablolama, regülasyon ekipmanları, sigorta kutuları gibi ekipmanlardan oluşmaktadır. Kütle kıyaslaması yapılabilmesi için, kimyasal itki kullanan uydu (KİKU) ve elektrikli itki kullanan uydunun (EİKU) güç tüketim değerleri bakımından kıyaslaması yapılarak, güç sistemlerinin boyutlandırılması gerekmektedir. Kıyaslamada iki uydu modeli için, faydalı yük (9kW) ve servis modülü (0,5 kW) güç ihtiyaçları sabit tutulmuştur. Elektrikli itki kullanan uydu için Hall Effect Thruster SPT-140 kullanılacağı varsayılmış olup itki için güç tüketim değeri 3 kW olarak varsayılmıştır [Snyder, Lenguito, Frieman, Haag ve Mackey, 2018]. Kimyasal itki kullanan uydu için ise tüketimi çok düşük olduğu için ihmal edilmiştir. İki uydu için oluşturulan güç bütçesi Tablo 2'de verilmiştir.

	Kimyasal İtki Si	stemi'ne Sahip	Elektrikli İtki Sistemi'ne Sahip			
	Uy	Uydu				
	Gün içi	Gölge	Gün içi	Gölge	EOR	
H. Modülü (W)	9000	9000	9000	9000		
Servis Modülü (W)	500	500	500	500	500	
Elektrikli İtki (W)			3000		3000	
Toplam (W)	9500	9500	12500	9500	3500	

Tablo 2:Güç Bütçesi Karşılaştırması

Tablo 2'de görüldüğü üzere, kimyasal itki kullanan uydu yörünge transfer süresinin hem kısa olması hem de kimyasal itkinin güç ihtiyacının büyük olmamasından dolayı güç ihtiyacı gün içinde ve gölge süresinde sabit tutulmuştur. Elektrikli itki kullanan uyduda ise, yörünge koruma manevraları (station keeping) gün içinde yapılacağı varsayılmış olup, gölge süresinde elektrikli itki ile manevra yapılmayacağı varsayılmıştır. Yörünge yerleşme süresinde ise her iki uydu için faydalı yük kapalı olduğundan kritik bir güç ihtiyacı olmamaktadır.

Güç bütçesinin yanı sıra, iki uydu için güç sistemi kıyaslamasında kullanılacak girdiler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3:Güç Boyutlandırılmasında Kullan	Ilacak Girdiler
---	-----------------

Güç sistemi						
Güneş Hücreleri	Azur-Space-3G30					
Pil	Saft-VES140					
Güç Kablosu	AWG-16					
Regülasyon	S3R(DET)					
Bara Gerilimi	100 V					
Pil Şarj Düzenleyici Verimi	%96					
Pil deşarj Düzenleyici Verimi	%96					
Pil deşarj Düzenleyici Gerilim Aralığı	55V-95V					
Maksimum Deşarj Derinliği	%80					
Operasyon Sıcaklık Aralığı	30-50 [°C]					
Marj	%5					

*Regülasyon ekipmanı için Thales NG güç regülasyon ünitesi verileri referans alınmıştır.

*Güneş hücreleri Azurspace-3G30 verileri referans alınmıştır.

*Pil için SAFT-VES140 verileri referans alınmıştır.

*Güç kablosu için GoreSpace AWG16 kablo verileri referans alınmıştır.

<u>Güneş Paneli Boyutlandırılması:</u> Sistemin ihtiyacı olan gücü birincil kaynak olarak güneş panelleri sağlamaktadır. Güneş panellerinin kütlesini bulmak için, seri bağlı ve paralel bağlı hücre sayısının hesaplanması gerekmektedir. Güç boyutlandırması için seçilen Azurspace-3G30 hücreye ait özellikler Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'de verilmiştir.

Azurspace Güneş Hücresi Özellikleri				
Hücre Tipi	Azurspace 3G30C			
Doldurma Faktörü	0.8			
Hücre Boyutu	80x40 mm			
Hücre Alanı	30,18 cm ²			
Hücre Kütlesi	86 mg/cm ²			

Tablo 4: Azurspace-3G30 Hücre Özellikleri

Tablo 5:3G-30 Güneş Hücresi Etki Eden Radyasyona Göre Performans Verileri

			BOL	1E15
Ortalama Açık Devre Akımı	Voc	[mV]	2700	2522
Ortalama Kısa Devre Akımı	I _{SC}	[mA]	520,2	501,9
Maksimum Güçteki Gerilim	V _{MP}	[mV]	2411	2246
Maksimum Güçteki Akım	I _{MP}	[mA]	504,4	486,6
Ortalama Verim	η	[%]	29,8	26,8
		2 0.0 <i>G</i>		

*Spektrum: AMO WRC = 1367 W/m2 ; $T = 28 \ ^\circ C$

Tablo 6:3G30 Güneş Hücresi Sıcaklık Değişimine Göre Performansı

		BOL	1E15
Açık Devre Gerilimi	ΔV _{OC} /ΔΤ ↑	-6,0	-6,3
Kısa Devre Akımı	ΔΙ _{SC} /ΔΤ ↑	0,32	0,39
Maksimum Güçteki Gerilim	ΔV _{MP} /ΔT↑	-6,1	-6,4
Maksimum Güçteki Akım	ΔΙ _{ΜΡ} /ΔΤ ↑	0,28	0,29

*Radyasyon 1MeV [e/cm²] akısı altında performans

Panel boyutlandırması için en kötü senaryo baz alınarak misyon sonuna (15 yıl) kadar ihtiyaç olan tüm gücün sağlanması gerekmektedir. Uzay şartlarından, beklenmedik operasyon bozulmalarından kaynaklı güneş panellerinin üreteceği güç değeri düşmektedir. Özellikle, EİKU için yörüngeye yerleşme süresinin uzun sürmesinden kaynaklı olarak uydunun farklı uzay şartlarına maruz kalacağı için güneş panellerinde yaşlanma oranı hızlanmaktadır. Yaşlanma oranı fırlatıcının bıraktığı yörünge ve eğiklik (inclination) açısına göre değişmektedir. Örneğin Ariane 5 fırlatıcısı ile gönderilen EİKU'nun yörünge transfer süresince güneş hücrelerinde yaşlanma oranı, toplam misyon süresindeki yaşlanma oranınına ek olarak %0,7'dir. KİKU için ise bu durum ihmal edilebilmektedir [Velez, Artola, Berend, David, Dirassen, Hubert, Ingumbert, Lazaro, Nuns, Packan, Paulmier ve Sarrailh, 2017]. Azurspace veri sayfasına göre misyon sonu radyasyon ve sıcaklığa bağlı etkilerden dolayı (1E15) üretilecek akım ve güç eğrisi değişmektedir. (Şekil 2)



Şekil 2:Radyasyona Bağlı Akım Gerilim Karakteristiği [Brown 2002]

Veri sayfasına göre, en kötü senaryo (50°C) da güneş hücresinin üretebileceği gerilim denklem 1'e göre hesaplanmaktadır[Park ve Cha, 2016].

$$V_{mp}(T) = V_{mp}(T_0) + \left(\frac{dV_{mp}}{dT}\right) * \Delta T$$
⁽¹⁾

 $\Delta T = T - T_0$, T güneş hücresi sıcaklığı olup, T_0 referans sıcaklık değeridir. Seri bağlanacak hücre sayısı gerilim düşümünü (2,5V) gözeterek, bara gerilimini (100V) sağlamalıdır.

$$N_s = \frac{(V_{bara} + V_{g.d})}{V_{mp}(T)} \tag{2}$$

N_s :Seri bağlanacak güneş hücre sayısı

V_{bara} :Bara gerilimi (100V)

V_{a.d} :Gerilim düşümü, kablo kayıpları (2,5V)

Denklem 2 ile seri bağlanması gereken hücre sayısı hesaplandığında, her iki uydu için 49 adet seri bağlanması gereken hücre olmalıdır. Uyduların ihtiyacı olan akım ise Şekil 2'de de gösterildiği üzere en kötü senaryo sıcaklığına göre (30°C) denklem 3'e göre hesaplanmaktadır.

$$I_{mp}(T) = I_{mp}(T_0) + \left(\frac{dI_{mp}}{dT}\right) * \Delta T$$
(3)

Üretilen akım normal şartlarda güneş sabitinin 1367W/m² olduğu koşullara göre değerlendirilmiştir. Fakat güneş sabiti sezona göre değişmektedir. En düşük güneş sabiti yaz dönümünden sonrasına denk gelmektedir. Bu sezonda güneş sabitinin minimum olduğu koşulların (0,88) ve kayıp faktörünün (0,97) dikkate alınmasıyla üretilecek akım değeri azalacaktır [Rauschenbach,1976]. $I = I_{mp} * 0,88 * 0,97$ (4)

Güneş hücre dizilerinin üreteceği güç miktarı aynı koşullar altında (30°C) değişecektir. Denklem 1 bu sıcaklık değerine göre düzenlenerek, bir dizinin üreteceği gerilim (V_{dizi}) değeri hesaplanabilir. Bir dizinin üretebileceği güç ise P_{dizi} denklem 5'e göre hesaplanabilir.

$$P_{dizi} = V_{dizi} * I \tag{5}$$

*P*_{dizi} :Güneş panellerindeki bir dizinin üretebileceği güç

 V_{dizi} :Bir dizinin gerilim değeri

I :Güneş hücresindeki üretilen akım

Güneş hücrelerinin, misyon sonunda güç miktarı hesaplandıktan sonra, paralel biçimde yerleştirilmesi gereken hücre sayıları bulunması gerekmektedir. Paralel biçimde bağlanması gereken hücre sayısı (*N*_p) denklem 6'ya göre hesaplanmaktadır.

$$N_p = \frac{P_{sa}}{P_{dizi} * n_k} \tag{6}$$

*P*_{sa} :Güneş panellerinin gün içinde üretmesi gereken güç(Marj dahil)

*P*_{dizi} :Güneş panellerindeki bir dizinin üretebileceği güç

 n_k :Dönüştürücüden kaynaklı kayıp faktörü (0,92) [Pisacane, 2005]

Hesaplamalar yapıldığında paralel yerleştirilmesi gereken güneş hücresi sayısı KİKU için 238, EİKU için 313 adettir. Uydu gölgeden çıkınca pillerin doldurulması için ayrılmış hücreler olacaktır. Piller için ayrılmış güneş hücrelerinin boyutlandırması, pil boyutlandırması tamamlandıktan sonra yapılacaktır.

<u>Pil boyutlandırılması</u>: Piller gölge süresinde uydunun güç ihtiyacını karşılamaktadır. Pil boyutlandırılması için seçilen Saft-VES140 hücresine ait özellikler Tablo 7'de verilmiştir.

Özellik	Birim	Değer
Nominal Kapasite	Ah	40
Maksimum Gerilim	V	4.1
Minimum Gerilim	V	3
Ortalama Gerilim	V	3.5
Bypass Direnci	μU	100

Tablo 7:Saft VES-140 Pil Özellikleri

Yere durağan uydular için maksimum gölge süresi 72 ($T_{gölge}$) dakikadır. Misyon süresi boyunca pil

deşarj derinliğinin (DOD) %80'in altına inmeyeceği varsayılmıştır. Gölge süresi boyunca toplam sağlanması gereken enerji denklem 7'e göre hesaplanmaktadır.

$$E_{toplam} = P * \frac{T_{g\"olge}}{DOD * \eta_{BDR}}$$
(7)

Etoplam :Gölge süresince pillerin sağlaması gereken enerji

P :Uydu güç ihtiyacı

 $T_{g\"olge}$: Maksimum gölge süresi

DOD :Deşarj Derinliği

 η_{BDR} :Pil deşarj düzenleyicisi verimi

Denklem 7'e göre gerekli işlemler yapıldığında pillerin KİKU için 15,58 kW saat, EİKU için 20,5 kW saat kadar enerji sağlanması gerekmektedir. Seri bağlanacak pil sayısının pil deşarj

düzenleyicisinin giriş gerilimini (55V-95V) sağlaması gerekmektedir Buna göre iki uydu içinde seri bağlanabilecek minimum ve maksimum pil sayıları Tablo 8'de gösterilmiştir.

Özellik	Minimum	Maksimum
Pil Sayısı	$N_s = \frac{55}{3} \cong 18$	$N_s = \frac{95}{4.1} \cong 23$

Paralel bağlanacak pil sayısı ise, denklem 8'e göre hesaplanmaktadır.

$$N_p = \frac{E_{toplam}}{V_N * Ns * C} \tag{8}$$

N_P :Paralel bağlanacak pil sayısı

Etoplam :Gölge süresince pillerin sağlaması gereken enerji

 V_N :Pil nominal gerilimi

*N*_S :Seri bağlanacak pil sayısı

C :Pil nominal kapasitesi

Buna göre iki uydu için seri ve paralel bağlanabilecek pil konfigürasyonları Tablo 9 ve Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 9:Kimyasal İtki Kullanan Uydu için Pil Konfigürasyonları

Seri Bağlı H.S.	Paralel bağlı H.S.	Min. Pil Çıkış Gerilimi (V)	Bypass kaynaklı gerilim düşümü (Vg.d)	Min. Pil Çıkış Gerilimi (Vçmin)	Maksimum Çıkış Gerilimi (Vçmax)	Bypass kaynaklı enerji kaybı (Wh)	Toplam Sağlanan Enerji (Wh)	Energy ihtiyacı (Wh)	Toplam Pil Sayısı
18	7	54,0	0,35	53,7	73,8	67	17557	15586	126
19	6	57,0	0,35	56,7	77,9	63	15881	15586	114
20	6	60,0	0,35	59,7	82,0	60	16725	15586	120
21	6	63,0	0,35	62,7	86,1	57	17569	15586	126
22	6	66,0	0,35	65,7	90,2	55	18412	15586	132

Tablo 10:Elektrikli İtki Kullanan Uydu için Pil Konfigürasyonları

Seri Bağlı H.S.	Paralel bağlı H.S.	Min. Pil Çıkış Gerilimi (V)	Bypass kaynaklı gerilim düşümü (Vg.d)	Min. Pil Çıkış Gerilimi (Vçmin)	Maksimum Çıkış Gerilimi (Vçmax)	Bypass kaynaklı enerji kaybı (Wh)	Toplam Sağlanan Enerji (Wh)	Energy ihtiyacı (Wh)	Toplam Pil Sayısı
18	9	54	0,46	53,5	73,8	115	22536	20508	162
19	8	57	0,46	56,5	77,9	109	21143	20508	152
20	8	60	0,46	59,5	82	104	22270	20508	160
21	8	63	0,46	62,5	86,1	99	23396	20508	168
22	7	66	0,46	65,5	90,2	94	21442	20508	154

Tablo 9 ve Tablo 10'da görüldüğü üzere iki uydu içinde farklı sayılarda seri bağlı ve paralel bağlı pil hücre seçilebilmektedir. Her bir seçenek ayrı ayrı değerlendirilerek sağlayabileceği enerji miktarı ve herhangi bir bozulma durumunda sistem marjı ele alındığında, optimizasyonu sağlamak için seri pil hücre sayısı iki uydu için 21 seçilmiştir. 2 tane pil modülünün işlevini yitirmesi durumunda misyon devam edebilecektir. Paralel bağlanması gereken pil sayısı ise KİKU için 6, EİKU için 8'dir.

Piller için ayrı koyulması gereken ek güneş hücreleri sayısı ise en kötü senaryo gözetilerek hesaplanmaktadır. Uydu maksimum gölge döneminden (72 dakika) çıktığı zaman diğer gölge dönemine girene kadar pillerin şarj edilmesi gerekmektedir. Bunun için gerekecek zaman 1368 dakika olarak hesaplanmaktadır. Buna göre paralel biçimde bağlanacak güneş hücrelerin sağlaması gereken güç değeri pil şarj düzenleyici verimleri göz önüne alınarak denklem 9'a göre hesaplanmaktadır.

$$P_{GP2} = \frac{E}{\eta_{BCR} * T_d} \tag{9}$$

*P*_{GP2} :Pil şarjı için güneş panellerinin üretmesi gereken güç

E :Gölge süresince pillerin sağladığı Enerji (DOD etkisi dahil değildir.)

 η_{BCR} :Pil şarj düzenleyicisi verimi

T_d :Gündüz süresi

Hesaplamalara göre minimum üretilecek akım denklem 4'te bulunmuştu. Denklem 6 yeniden düzenlenirse, iki uydu modeline piller için ayrılması gereken paralel bağlanacak güneş hücre sayıları KİKU için 14, EİKU için 18 adettir.

<u>Kablolama Boyutlandırılması:</u> Uyduların kablolaması ilk fazlarda tam olarak kestirilemediğinden, genel varsayımlara göre hesaplamalar yapılmaktadır. Bu bölümde, genel yaklaşım yapılarak sadece güç kabloları (Güneş panel-Regulasyon Unitesi ve Batarya-Regulasyon Unitesi bağlantısı) için çalışma yapılmıştır.

Kabloların demet halinde akım taşıma kapasiteleri değişmektedir. Bu değişim K faktörü ile ifade edilmektedir. ECSS'te belirtilen demet sayısına göre K faktörünün değişimi Tablo 11'de verilmiştir. [ECSS, 2011]

	AWG 12-32		
Kablo Sayısı	K		
7 <n<19< td=""><td>0.81-(0.15*ln(N))</td></n<19<>	0.81-(0.15*ln(N))		

Tablo 11:K faktörü Hesaplama	Yaklaşımı
------------------------------	-----------

*Çalışmada 8'li demet halinde AWG16 kablo (Bakır) kullanılmasına karar verilmiştir.

*Güç kabloları için mesafe 5 m olarak varsayılmıştır.

Demet sayısına göre kabloların taşıyacağı maksimum akım değeri yine ECSS'e göre formül 10'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$I_{Dmaksimum} = I_{maksimum} * K \tag{10}$$

*I*_{Dmaksimum}:Demet halinde bir kablonun akım taşıma kapasitesi

I_{maksimum} :Tek kablonun akım taşıma kapasitesi

K : Demet biçimine göre akım indirgeme faktörü

Tek damarlı AWG16 kablosunun maksimum akım taşıma kapasitesi 13 amperdir [ESCC, 2013]. İhtiyaç duyulan akıma göre, hesaplamalar yapıldığında gerekecek kablo miktarları KİKU için 8'li demet halinde toplam 36 adet iken, EİKU için 8'li demet halinde toplam 48 adettir. Her iki uydu için güç boyutlandırmasının özeti Tablo 12'de gösterilmiştir.

Ekipmanlar	Birim	κίκυ	ΕΪΚυ
Güneş paneli	[Ad]	49X(238+14)	49X(313+18)
Batarya	[Ad]	21X6	21X8
Kablolama	[Ad]	36X8	48X8

Tablo 12:Her İki Uydu için Güç Boyutlandırması

UYGULAMALAR

Kütle Hesabı Yaklaşımı

<u>Güneş Paneli Kütlesi:</u> İki uydu için belirlenen güneş hücre sayılarından sonra, hücrelerin kaplayacağı mekanik alanın bulunması gerekmektedir. Hücrelerin kaplayacağı mekanik alan denklem 11'a göre hesaplanmaktadır.

$$A_{MA} = N_S * N_P * \frac{A_{SA}}{FF} \tag{11}$$

A_{MA} :Güneş hücrelerinin mekanik alanı

 N_{S}, N_{P} :Güneş hücrelerinde seri ve paralel hücre sayısı

A_{SA} :Güneş hücresi alanı

FF :Doldurma faktörü

Hücrelerin kütlesi, mekanik alanın hesaplanmasıyla birlikte denklem 12'ye göre hesaplanmaktadır.

$$M_{GP} = A_{MA} * M_{H \ddot{u} cre} \tag{12}$$

M_{GP} :Güneş hücresi toplam kütlesi

M_{hücre} :Tek güneş hücresi kütlesi

Yapılan hesaplamalar sonucunda iki uydu modeli için hücrelerin toplam kütleleri, KİKU için 40 kg, EİKU için ise 52,6 kg olmaktadır. Güneş hücreleri için kullanılacak mekanik yapının kütlesini hesaplamak için panel sayısı hesaplanarak, boyutlandırılması gerekmektedir. Uydunun her iki tarafında güneş paneli olacağı için, tek bir kanat için gereken alan güneş hücresinin mekanik alanın (*A_{MA}*)yarısına eşittir diyebiliriz. Buna göre aşağıda Şekil 3'de gösterilen tek bir panelin boyutunu formül 13 ve 14'e göre hesaplayabiliriz [Safak, 2013].



Şekil 3:Güneş Hücrelerinin Panel Üstüne Yerleştirilmesi

$$A = M * C + (M - 1) * F$$
(13)

$$B = N * D + (N - 1) * E$$
(14)

- C :Güneş hücresi genişliği (80mm)
- D :Güneş hücresi uzunluğu(40mm)
- *E* :İki hücre arasında düşey boşluk(2mm)
- F :İki hücre arasında yatay boşluk (2mm)
- N :Seri bağlı hücre sayısı
- *M* :Paralel bağlı hücre sayısı/ toplam panel sayısı

Seri bağlı güneş hücrelerinin aynı panelde olması gerekmektedir. Panelin uzunluğu ise M parametresine bağlı olarak toplam kullanılacak panel sayısına bağlıdır. İki uydu için panel boyutlandırmasının seçenekleri Tablo 13'de verilmiştir.

Durum	Her bir kanattaki Panel Sayısı	N (Seri Bağlı hücre sayısı)	M (Paralel Bağlı hücre sayısı)	A (m)	B (m)	Panel Alanı (m²)	Toplam Güneş hücresi Alanı (m²)
κίκυ							
1	2	49	63	5,164	2,056	10,62	42,47
2	3	49	42	3,442	2,056	7,08	42,46
3	4	49	32	2,622	2,056	5,39	43,13
4	5	49	26	2,13	2,056	4,38	43,79
EİKU							
1	2	49	83	6,814	2,056	14,01	56,04
2	3	49	56	4,59	2,056	9,44	56,62
3	4	49	42	3,442	2,056	7,08	56,61
4	5	49	34	2,786	2,056	5,73	57,28

Tablo 13:İki Uydu Modeli İçin Panel Boyutlandırma Konfigürasyonları

İki uydu içinde panel sayısı seçilirken hem maliyet hem de hacim bakımından optimizasyonun sağlanması gerekmektedir. Ayrıca elektrikli itki sistemine sahip uydular için DTMA kullanılmaktadır. Bu robotik kol ile güneş paneli kapalı pozisyonda birbirine temas etmemelidir. Bu durum göz önüne alınarak optimum sayıda panel için KİKU 8 adet 2622x2056 mm, EİKU için ise 8 adet 3442x2056 mm boyutunda panel kullanılmasına karar verilmiştir. Mekanik yapıda kullanılacak materyal için ise alüminyum bal peteği seçilmiştir. İçeriği petek (core), yüz koruyucusu (face sheet) ve yapıştırıcı malzemelerden oluşmaktadır. Petek için yoğunluğu 50 kg/m³ olan Al-5056-50-3 malzemesi seçilirken yüz koruyucusu için ise yoğunluğu 1570 kg/m³ olan HexPly 954-6/M55J malzemesi seçilmiştir. Büyük uydular için petek kalınlığı 30mm ve yüz koruyucusu için ise 1 mm kullanılmaktadır [Teng, Zheng ve Jin, 2019]. Hesaplamalar yapıldığında materyal kütlesi KİKU için 200 kg, EİKU için ise 262 kg olmaktadır. Kullanılacak bağlantı elemanları, koruma materyalleri gibi ekipmanlar gözetilirse aradaki kütle farkı daha da artacaktır.

<u>Pil Kütlesi:</u> İki uydu için bağlanacak pil adetleri daha önce belirlenmişti. Her pil hücresinin kütlesi Saft veri sayfasına göre 1.13 kilogramdır. Piller için toplam kütle, denklem 13'e göre hesaplanmaktadır.

$$M_{Pil} = N_{TP} * M_{H \ddot{u} cre} \tag{15}$$

M_{pil} :Toplam pil kütlesi

*N*_{TP}: :Toplam pil sayısı

Mhücre: :Pil hücresinin kütlesi

Sadece pil hücreleri için kütle miktarları KİKU için 142 kg iken EİKU için 190 kilogramdır. Pillerin konfigürasyonu ve kullanılacak plaka Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4:Batarya Entegrasyon Görseli

*İki uydu modeli içinde 2 adet plaka kullanılmaktadır.

İki uydu için gösterilen pil konfigürasyonundan sonra pillerin platformuna yerleştirilmesi gerekmektedir. İki uydu için kullanılan plakaların uzunlukları sabit tutulmuş olup aynı platform uydu modeli kullanılacağı varsayılmıştır. Fakat plaka genişliklerinde ise pil modüllerinin sayısından kaynaklı farklı uzunlukta genişlikler oluşmaktadır. Şekil 5'de plakanın üstüne modüllerin hangi ölçülerde yerleştirileceği gösterilmektedir. Saft veri sayfasına göre pil hücrelerinin çapları 53 mm olup, hücreler arası yatay ve düşey mesafe 2mm olarak varsayılmıştır. Ayrıca modüllerin plakaya uzaklıkları 50 mm olarak varsayılmıştır. EİKU için tek modülde 8 pil hücresi bulunurken, KİKU için ise 6 pil hücresi bulunmaktadır. Hücrelerin yerleştirilme biçimine göre kullanılacak plakaların genişlikleri sırasıyla KİKU için 40,2 cm, EİKU için ise 54,8 cm'dir.



Şekil 5:Pil Modüllerinin Yerleştirilmesi (EİKU)

Mekanik yapı için kullanılacak malzeme alüminyum petek (core) 3/16 5056-0.002P olarak seçilmiş olup, malzemenin yoğunluğu 91 kg/m³'dür [Wijker, 2008]. Yüz koruyucusu için ise 2024 T81 alüminyum alaşımı plakası seçilmiş olup malzemenin yoğunluğu 2780 kg/m³'dür. Buna göre iki uydu için petek kalınlığı 20 mm yüz koruyucusu için ise 1 mm olarak seçilmiştir. Malzeme yoğunluğu ve hacmi kullanılarak kütle hesabı yapılabilmektedir [Wiley, 1999]. Farklı hacimlere sahip plakalar için kütle hesabı yapıldığında KİKU için 11,8 kg, EİKU için ise 16,2 kg plakaya ihtiyaç vardır.

<u>Kablolama kütlesi:</u> AWG16 kablosu veri sayfasında kilometre başına kablo kütlesi 13,39 kg/km olarak belirtilmiştir. Kullanılması gereken kablo uzunluğu ve adedi daha önce belirlenmişti. Sonuçta KİKU için yaklaşık 19,8 kg, EİKU için 25,7 kg kablo gerekmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada, iki uydu modeli için güç boyutlandırması sonunda, güç sistemi için kullanılacak ana ekipmanların kütleleri Tablo 14'de gösterilmiştir.

Ekipmanlar		Birim	κίκυ	ΕΪΚυ		
Güneş Paneli						
	Güneş Hücresi	Kg	40	52,6		
	Petek Plaka	Kg	200	262		
Pil						
	Pil hücresi	Kg	142	190		
	Petek Plaka	Kg	11,8	16,2		
Kablolama		Kg	19,8	25,7		
Toplam		Kg	413,6	546,5		

Tablo 14:İki Uydu Modeli İçin Kütle Kıyaslaması

İki uydu modeli için yapılan güç sistemi boyutlandırma sonucunda, uyduda kimyasal itki yerine elektrikli itki tercih edilmesi sonucunda güç sistem ekipman kütlesinde %32 kütle artışı görülmüştür. Elektrik güç sistemindeki bu artış uydunun yakıt sisteminden kaynaklı kütle kazanımına göre çok düşük kaldığından EİKU, KİKU'ya göre çok daha düşük kütleli olmaktadır. Tam elektrikli itki kullanan uydunun fırlatma/kuru kütle oranı yaklaşık 1.3'tür [Patela, Reddyp Ahmadc, Satheeshd ve Re, 2018]. Bunun anlamı kuru kütlede bir kilogram kazanç sağlanması halinde yaş kütlede 1.3 kg kazanç sağlanacaktır. Uydu üreticisinin yakıt kütlesindeki kazancı sistem üzerinde daha verimli kullanabilmesi için güç sistemindeki kütle artışını en aza indirgemelidir. Yörünge transfer sürelerinin kısaltılması ve ekipman teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte güç sistemi optimizasyonu sağlanarak kütle kazancı hedeflenmektedir. İleriye dönük çalışma kapsamında, elektrikli itki sisteminin uyduda kullanılması durumunda güç sistemi ekipmanlarının hacimsel boyutlandırılması değerlendirilmektedir.

Kaynaklar

- Agarwal A., Uma B., Muthusamy S., Sudbakar M. ve Venkataramanan S.T., 2008, National Conference on the Emerging Trends in Photovoltaic Energy Generation and Utilisation, Mart
- European Space Components Coordination Specification Specification No:3901/019
- Brown C.D., Elements of Spacecraft Design 2004 s. 343
- ECSS-Q-ST-30-11C, Space Product Assurance, Ekim 2011
- Vélez J.C.M., Artola L., Bérend, N., David J.-P., Dirassen B., Hubert G., Inguimbert C., Lazaro D., Nuns Th. Packan D., Paulmier Th. ve Saraailh Th., 2017 Electric Propulsion Conference Ekim
- Park H. ve Cha H, Int'l J. Of Aeronautical SpaceSci., 2016
- Patela G.P., Reddyp G.P., Ahmadc I., Satheeshd P. ve Re A., 2001, International Journal of Pure and Applied Mathematics, Ocak
- Pisacane V. L., Fundamentals of Space Systems, 2005 Oxford University Press, s. 246
- Rauschenbach H. S., Solar Array Design Handbook, 1976
- Safak G., Structural Design and Analysis of a Solar Array Substrate for a GEO Satellite, 2013, s. 35-36
- Snyder J.S., Lenguito G., Freiman J.D., Haag T.W. ve Mackey, J.A., 2018 Propulsion and Energy Forum, 9-11 Temmuz
- Teng L., Zheng X.D., Jin Zh. H., 2019, International Journal of Aerospace Engineering, Şubat Wijker J., *Spacecraft Structure*, 2008, Springer, s. 211,216
- Wijker 5., Opaceeran Oliaciane, 2000, Opiniger, 3. 211,210
- Wiley L. ve James R.W., Space Mission Analysis and Design, 1999, Klewer, s.490